

VŠB – Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

Vysokorychlostní nástřik plamenem  
(HVOF) vrstev na bázi WC-Co  
High Velocity Oxygen Fuel  
(HVOF) WC-Co Coating

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Petr Žváček  
Ing. Vladislav Ochodek

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Petr Žváček**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF) vrstev na bázi WC-Co  
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) WC-Co Coating

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte charakteristiku technologií žárových nástřiků se zaměřením na vysokorychlostní nástřik plamenem.
2. Proveďte studii vybraných přídavných materiálů na bázi WC-Co.
3. Ověřte základní vlastnosti zkušebních nástřiků.
4. Proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

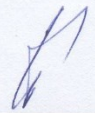
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
ASM. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM 2004.  
PAWLOWSKI, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*.  
Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2008, ISBN: 978-0-471-49049-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

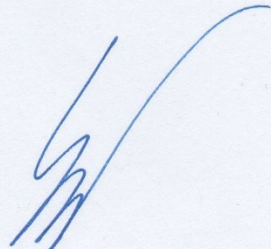
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. Května 2018.

Podpis studenta

.....

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. Května 2018.

.....  
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Petr Žváček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Cihlová 11, Janovice u Rýmařova

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŽVÁČEK, P. *Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF vrstev na bázi WC-Co*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2018, --s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Cílem bakalářské práce je hodnocení pórovitosti povlaku žárových nástřiků HVOF na bázi WC-Co. V teoretické části je popsán princip technologie žárových nástřiků, využití a souhrn jejich výhod a nevýhod. Větší část teoretické části je zaměřena na technologii nástřiku HVOF a přídavných materiálů ve formě prášku na bázi WC-Co. V experimentální části je provedeno metalografické šetření a experiment pro ověření pórovitosti povlaku žárových nástřiků na bázi WC-Co. Naměřené hodnoty jsou porovnány s dostupnou literaturou a je provedena diskuze dosažených výsledků.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ŽVÁČEK, P. *High Velocity Oxygen Fuel thermally sprayed WC-Co based coatings*: bachelor thesis. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2018, pp. Supervisor: Ochodek, V.

The aim of the bachelor thesis is to evaluate the porosity of the HVOF coating on the basis of WC-Co. The theoretical part describes the principle of thermal spray technology, its use and a summary of its advantages and disadvantages. Most of the theoretical part focuses on HVOF spraying technology and WC-Co-based additive materials. In the experimental part, an experiment is performed to verify the porosity of the WC-Co-based coatings made by HVOF technology. The measured values are compared with the available literature and the results are discussed.



# Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1   Žárové nástřiky .....</b>	<b>2</b>
1.1   Výhody technologie žárových nástřiků .....	2
1.2   Nevýhody technologie žárových nástřiků.....	2
<b>2   Technologie žárových nástřiků .....</b>	<b>2</b>
2.1   Nástřik plamenem .....	2
2.2   Nástřik elektrickým obloukem.....	3
2.3   Detonační nástřik .....	4
2.4   Plazmatický nástřik.....	5
<b>3   Žárový nástřik metodou HVOF.....</b>	<b>5</b>
3.1   Princip technologie HVOF .....	6
3.2   Aplikace HVOF nástřiku .....	7
3.3   Srovnání jednotlivých technologií žárových nástřiků .....	9
<b>4   Zařízení pro technologii HVOF .....</b>	<b>9</b>
4.1   Systém JP–8 000.....	9
<b>5   Mechanicko-fyzikální vlastnosti povlaků a jejich zkoušení .....</b>	<b>11</b>
5.1   Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti.....	11
5.2   Přilnavost povlaku k substrátu.....	12
5.3   Odolnost vůči opotřebení.....	12
5.4   Pórovitost .....	12
<b>6   Přídavné materiály .....</b>	<b>13</b>
6.1   Rozdělení přídavných materiálu dle formy .....	13
<b>7   Přídavní materiály pro HVOF .....</b>	<b>14</b>
7.1   Specifikace materiálu WC-Co 83/17 .....	14
7.2   Specifikace materiálu WC-Co 88/12 .....	14
7.3   Specifikace materiálu WC-CoCr 86/10/4 .....	15

7.4	Specifikace materiálu Stellite 6 .....	16
7.5	Specifikace Woka 3300 .....	18
<b>8</b>	<b>Metody měření pórovitosti .....</b>	<b>18</b>
8.1	Metodika dle normy ASTM E2109 – 01 .....	19
8.2	Odběr vzorků .....	19
8.3	Příprava vzorků.....	19
8.4	Postup měření .....	20
<b>9</b>	<b>Postup přípravy vzorků dle Struers .....</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Experimentální část .....</b>	<b>22</b>
10.1	Návrh experimentu .....	22
10.2	Zkušební vzoreky.....	23
10.3	Příprava vzorků.....	24
10.4	Vyhodnocení mikrostruktury povlaku a pórovitosti .....	24
10.5	Měření tloušťky nástřiků.....	32
10.6	Diskuze dosažených výsledků .....	35
<b>11</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>37</b>
<b>12</b>	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>39</b>
<b>13</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>42</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Název	Jednotka
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel	[–]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu povrchu	[μm]
HV	Tvrdost dle Vickerse	[–]
WC	Karbid wolframu	[–]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý	[–]
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	[–]
CH <sub>4</sub>	Methan	[–]
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Cyklopropan	[–]



## Úvod

V dnešní době, se hledají řešení ke snížení nákladů při výrobě nových strojních součástí. Jedna cesta může být vyrobení dostatečně odolného povlaku vůči opotřebení nebo korozi. V tu chvíli naskytuje se možnost na snížení požadavků mechanických vlastností základního materiálu a to se může odrazit ve snížení nákladů na celý vyráběný produkt.

Žárové nástřiky, neboli jinak termické, jsou v dnešní době velmi užitečné a používané. Svá uplatnění nachází jak ve výrobě nových součástí, tak i při renovaci starých opotřebovaných dílů. Nespornou výhodou oproti navařování je, že žárové nástřiky umožňují nanesení povlaku i na členité povrchy. Navíc při nanášení povlaku nedochází k zásadnímu tepelnému ovlivnění dané součásti jako u navařování. Povlaky žárovými nástřiky vybranými technologiemi dokonce dosahují i lepší jakost povrchu než například při galvanickém pokovení.

Povlaky žárových nástřiků nalézají široké využití v mnoha odvětvích průmyslu. Například nachází uplatnění pro povrchovou úpravu lopatek turbín jako ochrana proti kavitaci. V papírenském průmyslu se žárovými nástřiky povlakuje rozměňovací válec, nebo se využívají jako povrchová úprava krystalizátorů pro kontilitu [9]. Déle je možné je nalézt v automobilovém, sklářském, leteckém průmyslu, v medicíně a při renovaci.

Povlaky jako jiné výrobky podléhají výstupním kontrolám, na nichž se sleduje kvalita a přesnost výroby povlaků. Zkoušejí se mechanicko-fyzikální vlastnosti jako je tvrdost, mikrotvrdost, pevnost v tahu a jiné. V mé práci jsem se zaměřil na měření pórovitosti povlaků. Pórovitost žárových nástřiků je procesně závislý defekt, který ovlivňuje širokou škálu mechanicko-fyzikálních vlastností jako je tepelná vodivost, pevnost v tahu, tvrdost, odolnost vůči opotřebení a jiné. Proto je zapotřebí tuto negativní vlastnost povlaků sledovat, aby bylo možné zamezit výrobě zmetkových povlaků, popřípadě upravit výrobní parametry. V experimentální části bylo provedeno metalografické šetření povlaků žárových nástřiků a měření pórovitosti. Pórovitost byla měřena dle normy ASTM E2109 – 01 pomocí výpočetní techniky a příslušného grafického softwaru.

# **1 Žárové nástřiky**

Žárový nástřík je obecný termín pro skupinu povlakových procesů používaných pro nanášení kovových nebo nekovových povlaků. Tyto procesy jsou rozděleny podle zdroje energie do tří hlavních kategorií: nástřík plamenem, nástřík elektrickým obloukem a plasmatický nástřík. Tyto zdroje energie se používají k ohřevu povlakového materiálu (ve formě prášku, drátu nebo tyčinek) na roztavený nebo polo-roztavený stav. Výsledné zahřáté částice se urychlují a pohánějí směrem k připravenému povrchu buď technologickými plyny, nebo atomizačními tryskami. Při nárazu vzniká vazba povrchu s částicemi, které způsobují nárůst tloušťky povlaku a vytváří tak lamelární strukturu [1].

## **1.1 Výhody technologie žárových nástřiků**

Hlavní výhodou technologie žárových nástřiků je mimořádně široká škála materiálů, které lze použít k výrobě povlaků. Druhou výhodou je schopnost většiny technologií termických nástřiků nanášet povlaky na povrchy bez významného zdroje tepla. Materiály s velmi vysokými teplotami tání, jako je například wolfram, mohou být proto aplikovány na finálně opracované, celkově tepelně zpracované díly bez změny vlastností dílu a bez vnesení nadměrného tepla do součásti. Třetí výhodou je schopnost ve většině případů odstranit opotřebované nebo poškozené povlaky zásadních změny vlastností nebo rozměrů povlakované součásti [1].

## **1.2 Nevýhody technologie žárových nástřiků**

Nevýhodou je přímočarý charakter těchto depozičních procesů. Mohou být povlakovány jen povrchy na které lze nasměrovat hořák ve vhodném úhlu. Samozřejmě existují také omezení velikosti. Je nemožné povlakovat úzké a hluboké dutiny [1].

# **2 Technologie žárových nástřiků**

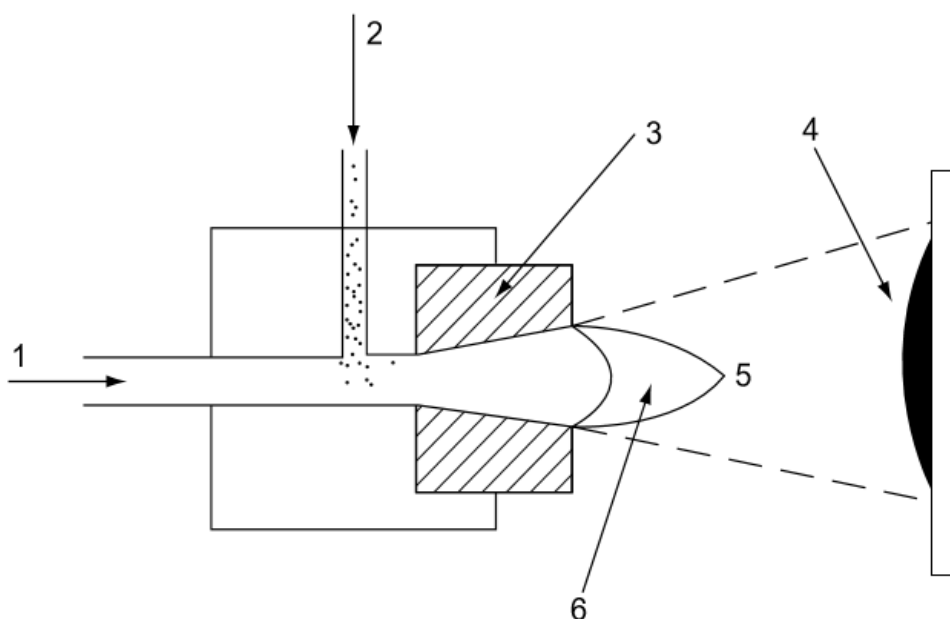
## **2.1 Nástřík plamenem**

### **2.1.1 Historie**

Nástřík plamenem je první vyvinutou technologií z oblasti žárových nástřiků. Byla vyvinuta švýcarským inženýrem Schoopem na počátku minulého století. Tento proces byl původně použit pro kovy s nízkou teplotou tání, jako je například cín nebo olovo, až později byl rozšířen na více žáruvzdorné kovy a dokonce i na keramiku [2].

### 2.1.2 Princip technologie

V plamenu rozprašovacího hořáku se chemická energie spalování palivového plynu v kyslíku využívá k vytvoření horkého plamene. Přívod plynu je axiální (1) a přidavný materiál (2) může být přiveden axiálně nebo kolmo k hořáku (3). Částice se roztaví v plamenu a zrychlují směrem k povlakovanému povrchu (4), čímž vytvoří výsledný povlak [2].



Obrázek 1.1 – Hořák pro nástřik plamenem [2]

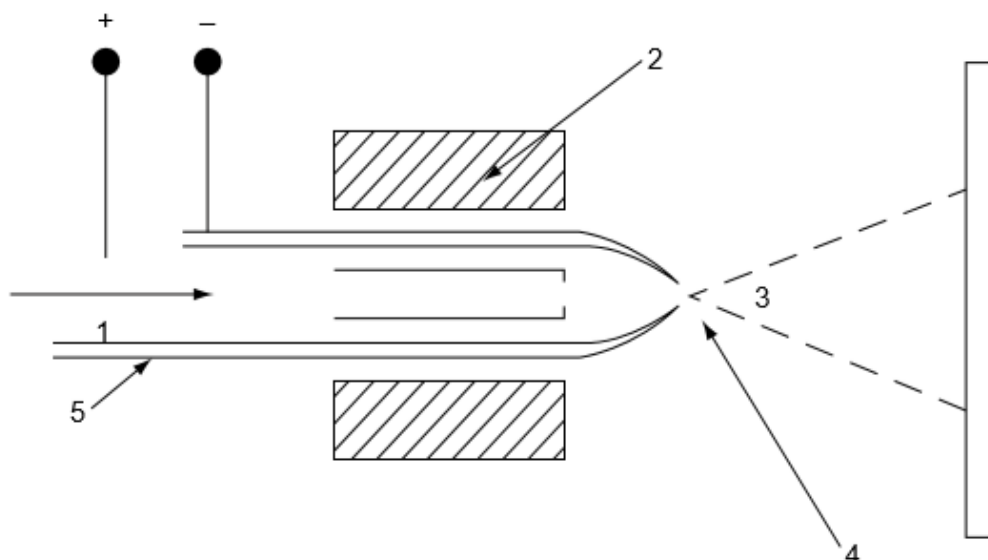
### 2.1.3 Vlastnosti povlaku

Pevnost vazby mezi povlakem a základním materiálem stanovená zkouškou povrchové přídržnosti může dosáhnout pro slitiny NiAl až 60 MPa. Pro keramické povlaky jsou hodnoty v rozmezí 15 až 30 MPa. Porozita se pohybuje v rozmezí 10 až 20 % a typické tloušťky těchto povlaku jsou v rozmezí od 100 do 2500  $\mu\text{m}$  [2].

## 2.2 Nástřik elektrickým obloukem

### 2.2.1 Princip technologie

Uvnitř hořáku pro nástřik elektrickým obloukem jsou dva vodiče (5), které jsou spotřebními elektrodami, jsou čerpány z cívky a tvoří po roztavení elektrickým obloukem (4) kapičky kovu. Kapičky kovu jsou atomizovány atomizačním plynem (1). Plyn atomizuje roztavenou kapičku a urychluje jemné částice (3) směrem k povlakovanému povrchu. Pokud jsou dráty vyrobeny z různých kovů, povlak může být vyroben povlak z takzvané pseudoslitiny [2].



Obrázek 1.2 – Hořák pro nástřik elektrickým obloukem [2]

### 2.2.2 Vlastnosti povlaku

Pevnost vazby mezi povlakem a základním materiálem stanovená zkouškou povrchové přídržnosti je v rozmezí 10 až 30 MPa pro Zn a Al povlaky, ale může dosáhnout hodnot až 70 MPa pro povlaky slitin NiAl. Porozita se pohybuje v rozmezí 10 až 20 %. Typické tloušťky těchto povlaků jsou 100 až 2000  $\mu\text{m}$  [2].

## 2.3 Detonační nástřik

### 2.3.1 Princip technologie

Hořák pro detonační nástřik (někdy též označovaný jako D-gun) obsahuje dlouhou, vodou chlazenou komoru s vnitřním průměrem asi 25 mm. Směs kyslíku a acetylenu je přiváděna do komory spolu s přidavným materiálem ve formě prášku. Směs je v komoře zapálena, exploduje a tato detonační vlna urychluje přidavný materiál. Aby bylo zabráněno zpětnému vzplanutí, se mezi explodující směsí přivádí inertní plyn, jako je dusík. Tento plyn také slouží k čištění komory [2].

Detonační proces má proto následující cykly:

- vstřikování kyslíku a paliva do spalovací komory
- vstřikování prášku a dusíku, aby bylo zabráněno zpětnému vzplanutí
- zapálení směsi a urychlení přidavného materiálu
- vyprázdnění komory dusíkem

### **2.3.2 Vlastnosti povlaku**

Porozita detonačních nástřiků jsou velmi malé, pro povlaky WC-Co se hodnoty pohybují okolo 0,5 % a pro  $\text{Al}_2\text{O}_3$  okolo 2%. Pevnost vazby mezi povlakem a základním materiálem stanovená zkouškou povrchové přídržnosti jsou v rozmezí 70 až 80 MPa. Typické tloušťky detonačních nástřiků nepřesahují 300  $\mu\text{m}$  [2].

## **2.4 Plazmatický nástřik**

### **2.4.1 Princip technologie**

Proces plazmatických nástřiků zahrnuje použití latentního tepla ionizovaného inertního plynu k vytvoření zdroje tepla. Nejběžnějším plynem k vytvoření plazmatu je argon. Argon proudí mezi elektrodou a tryskou. Vysoko frekvenční nebo vysokonapěťový střídavý elektrický oblouk je zasazen mezi trysku a wolframovou elektrodu, který ionizuje proud plynu a vytváří tak plazmatický paprsek. Do tohoto paprsku je přiváděn přídavný materiál na konci hořáku. Výhodou této technologie je možnost nanášení těžko tavitelných materiálů, jako je keramika [3].

### **2.4.2 Vlastnosti povlaku**

Pevnost vazby mezi povlakem a základním materiálem stanovená zkouškou povrchové přídržnosti nástřiků keramiky je v rozmezí od 15 do 25 MPa. Povlaky slitin NiAl nebo NiCrAl mohou dosáhnout pevnosti více než 70 MPa. Porozita je obvykle v rozmezí 1 až 7%, ale může být záměrně zvýšena. Tloušťky těchto povlaků jsou obvykle v rozsahu 300 až 1500  $\mu\text{m}$  [2].

## **3 Žárový nástřik metodou HVOF**

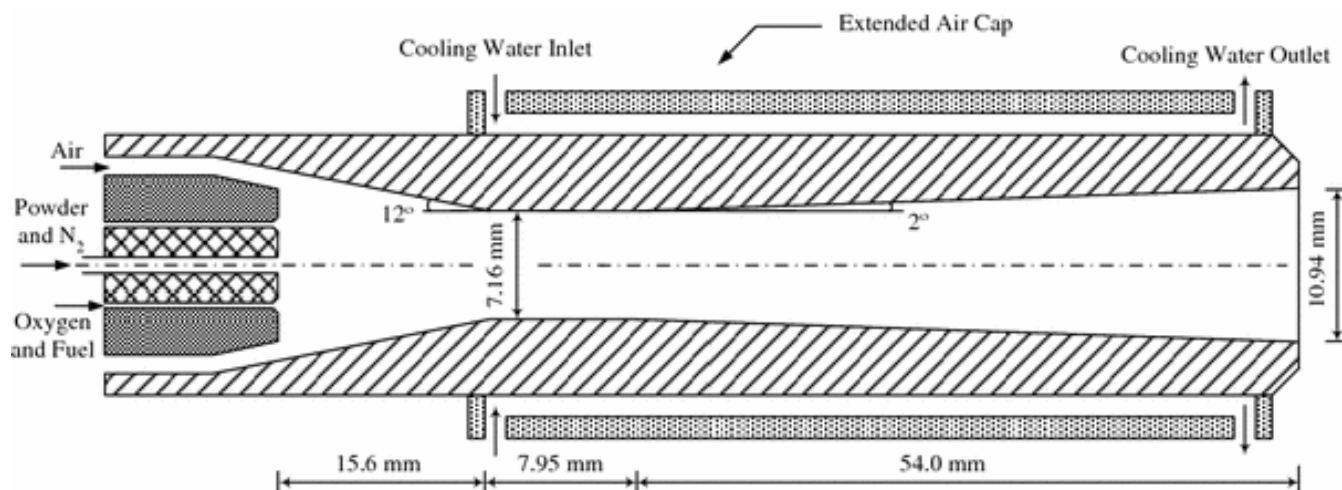
Technologie žárového nástřiku HVOF byla vynalezena v roce 1958 společností Union Carbide, ale nebyl komerčně známý až do počátku 80. let, kdy byla technologie oficiálně představen Jamesem Browningem. Nástřik metodou HVOF je v některých ohledech podobný detonačnímu nástřiku. Stejně jako v hořáku pro detonační nástřik, taky dochází ke spalování palivového média v komoře, ale na rozdíl od detonačního nástřiku je spalování kontinuální a ustálené. V současné době se tato technologie stala standartní technikou při nástřiku karbidů a má mnoho uplatnění v leteckém průmyslu, které byly dříve realizovány za pomoci nanášení elektrolytického chromu, jsou nyní nahrazovány nástřikem karbidů a slitin technologií HVOF. Technologie HVOF využívá vysokou kinetickou energii a řízený tepelný výkon k výrobě hustých povlaků s nízkou porozitou. Povlaky mají nízké zbytkové vnitřní napětí, tudíž mohou být zhotoveny povlaky větších tlouštěk. Vlivem vysoké

dopadové rychlosti natavených částic se do povlaku vnáší tlakové napětí na rozdíl od odlišných technologií [1][2].

### 3.1 Princip technologie HVOF

Zdrojem tepelné energie je zde směs kyslíku a paliva. V závislosti na požadavcích lze jako palivo použít propylen, propan, vodík, zemní plyn, nebo kerosin. Kyslík a palivo jsou odděleně axiálně vháněny do spalovací komory. Ve spalovací komoře dojde k atomizaci palivové směsi a následovně zapálení pomocí zážehové svíčky. Odtud plyny expandují do usměrňovacího systému a expanzní konvergentně divergentní trysky. Hořák dosahuje vysokých teplot, tudíž musí být chlazen. Chlazení je zajištěno kolující vodou v meziplášti hořáku. Prudká změna objemu plynů ve spalovací komoře, spojená s vysokou teplotou spalování, vytváří proud plynu o rychlosti 1525 až 1825 m.s<sup>-1</sup> na výstupu z trysky. Tlak je v komoře neustále sledován, aby se zaručily stabilní podmínky hoření a reprodukovatelnost procesu. Povlakový materiál je v práškové formě přiváděn do tzv. difuzoru pomocí nosného plynu dusíku. Podle konstrukce hořáku může být prášek přiváděn axiálně nebo radiálně. Prášek je v nadzvukovém plamenu nataven a vzniklé částice, jsou následovně urychleny tryskou směrem k povlakovanému povrchu. Schéma procesu nástřiku je na obrázku (1.3). Rychlost výstupu plynu je tak vysoká, že většina procesů HVOF vykazuje v proudu plynu tzv. „šokové diamanty“, které jsou zapříčiněny vznikem kompresních a expanzních vln.

Je důležité poznamenat, že existují dva odlišné typy hořáků. První třída je nazývána vysokorychlostní, je charakterizována tlaky v komoře 231kPa a tepelnými vstupy 527 MJ. Druhá třída je nazývána hyper rychlostní, pracující při tlacích 620 až 827 kPa, typickým palivem je zde kerosin [1][2][4][5].



Obrázek 1.3 – Schéma hořáku metody HVOF[6]

Překlad: (air – vzduch; powder and N<sub>2</sub> – prášek a dusík; oxygen and fuel – směs kyslíku a paliva; cooling water inlet – přívod chladicí kapaliny; extended air cap – rozšířený vzduchový uzávěr; cooling water outlet – výstup chladicí kapaliny)

Vysoká rychlost plynu generovaná technologií HVOF, která je mnohem větší než u běžného plamene nebo plazmatického nástřiku, zvyšuje rychlost částic a tím zvyšuje hustoty povlaku a přilnavost povlaku. Rychlosti částic se pohybuje okolo 800 m.s<sup>-1</sup>. Nižší průměrné teploty částic ve srovnání s plazmovým nástřikem snižují stupeň roztavení a oxidaci částic. Navzdory nižším průměrným teplotám částic jsou stále dosaženy vysoké hustoty povlaků díky vysokým nárazovým rychlostem částic. Část tepelné energie vzniká při nárazu z přeměny kinetické energie na tepelnou, což dále přispívá k produkci hustých povlaků [1][2].

#### **Výhody technologie HVOF:**

- Nízká pórovitost v důsledku vyšších nárazových rychlostí částic
- Nízký obsah oxidů v důsledku menšího času expozice částic atmosférickému kyslíku během letu.
- Vysoká soudržnost povlaku.
- Zlepšená ochrana vůči korozi díky menší pórovitosti.
- Tlustší povlaky díky menšímu zbytkovému pnutí.
- Vyšší tvrdost povlaku kvůli menší degradaci karbidových fází během letu.
- Nízká teplota částic při dopadu.
- Tlakové pnutí v povlaku.

#### **Nevýhody technologie HVOF:**

- Technologie je omezena pro vnější nástřiky.
- Hlučnost procesu až 130 dB.
- Vyžaduje zkušený a kvalifikovaný personál pro zajištění kvalitního povlaku.
- Technologie neumožňuje nanášení keramických povlaků.
- HVOF stříkání je obvykle nutné provádět s vhodným zařízením pro tlumení hluku a odsávání prachu.

### **3.2 Aplikace HVOF nástřiku**

Žárový nástřik technologií HVOF má svá využití v mnoha odvětvích. V letectví pro lopatky turbomotorů, lopatky kompresorů, ložiskové čepy. V energetickém průmyslu pro

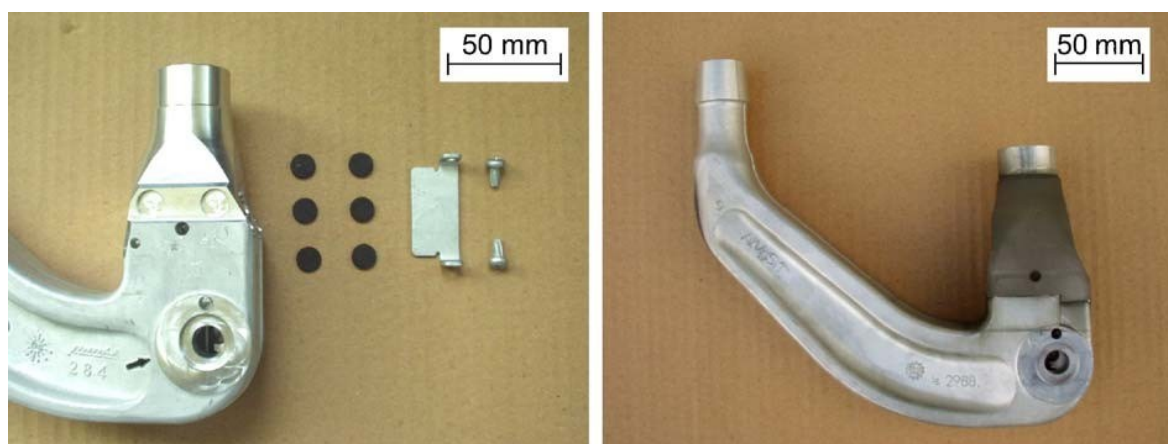


průmyslové plynové turbíny, pro trysky a lopatky peltonovy turbíny. V automobilovém průmyslu, těžkém průmyslu a při renovaci opotřeбенých dílů.

### 3.2.1 Aplikace v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu je moderní trend dělat automobily co nejlehčí, což šetří náklady na pohonné hmoty a tím i atmosféru od emisí CO<sub>2</sub>.

Pro příklad ušetření hmotnosti při výrobě automobilů pomocí nástřiků metodou HVOF jsou tyto táhla, které je možno vyrobít z tvrzené AlMgSi slitiny, namísto oceli. Nicméně k nízké odolnosti hliníkových slitin vůči opotřebení, musí být těleso táhla chráněno dalšími prvky, aby byly splněny všechny požadované mechanické zkoušky. Ochranné prvky vůči opotřebení jsou přišroubované k tělesu táhla (obr. 1). Tato varianta přináší zvýšený čas na obrábění pro výrobu příslušných výřezů a závitů, jakož i dodatečné montážní kroky dalších součástí a následně další pracovníky a zvýšenou celkovou výrobní dobu. Při nanesení ochranného povlaku metodou HVOF se konstrukce táhla značně zjednoduší, čímž se zkracuje i výrobní čas. Ve druhé variantě táhla s povlakem HVOF je celková hmotnost i výrobní čas nižší [16].



Obrázek 2 – Na levém obrázku je táhlo s ochrannými komponenty a na pravém táhlo s HVOF nástřikem v kontaktním místě [16].

### 3.3 Srovnání jednotlivých technologií žárových nástřiků

Tabulka 1 – Srovnání technologií [1]

Technologie	Nástřik plamenem	HVOF	Detonační nástřik	Nástřik elektrickým obloukem	Plazmatický nástřik
Teplota plamene [°C]	3500	5500	5500	> 25000	15000
Rychlost plamene [m.s <sup>-1</sup> ]	50 ÷ 100	500 ÷ 1800	-	500 ÷ 3000	150-250
Typ Plynu	O <sub>2</sub> , Acetylen	CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , acetylen	Vzduch, H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>
Teplota částic [°C]	2500	3300	-	> 3800	> 3800
Rychlost částic [m.s <sup>-1</sup> ]	50 ÷ 100	200 ÷ 1000	-	50 ÷ 100	200 ÷ 800
Rychlost přísunu materiálu [g/min]	30 ÷ 40	15 ÷ 50	-	150 ÷ 2000	50 ÷ 150
Porozita [%]	10 ÷ 20	<5	<5	10 ÷ 20	5 ÷ 10
Pevnost vazby povlaku [MPa]	7 ÷ 18	68	82	10 ÷ 40	<68
Obsah oxidů [%]	6	4	0,2	0,1	0,5 ÷ 3

## 4 Zařízení pro technologii HVOF

Pro reprodukovatelnost povlaků HVOF je zapotřebí důkladný záznam výrobních parametrů. Moderní zařízení HVOF se skládá z automatizované kontrolní a řídicí jednotky, hořáku, chladicího oběhu, podavače prášku a sady hadic s čerpadly.

### 4.1 Systém JP–8 000

Systém JP – 8000 je verze nové generace předešlého JP-5000 od výrobce Praxair Surface Technologies a TAFA.

Tento HVOF systém vyvíjí tlak ve spalovací komoře až 8,2 barů, ve srovnání s jinými systémy HVOF které jsou omezeny na 2 až 4 bary. Tento tlak převeden na vyšší rychlost částic a tím vyšší tvrdost a lepší celistvost povlaků.

Palivo ve formě kerosinu a směs kyslíku se mísí a atomizují po průchodu otvory do spalovací komory, čímž vzniká stabilní, čisté a jednotné spalování. Důležité je, že tlak ve spalovací komoře je sledován tak, aby byl zajištěn správný spalovací režim a konstantní tlak. Toto je sledováno pomocí průtokoměrů. Výstupní tryska je dimenzována a tvarována tak, aby vytvářela nadzvukový proud z ústí trysky a oblast nízkého tlaku, tam kde je přiveden práškový kov.

Na rozdíl od jiných HVOF zařízení, které vyžadují pečlivou kontrolu teploty chladicí vody, aby zajistili kvalitní povlak, hořáky JP – 8000 nejsou tak citlivé na teplotu vody. Tento hořák dovoluje vstupní teploty vody až do 80 °C.

JP – 8000 vyrábí kvalitní, opakovatelné povlaky díky přesné regulaci průtoků plynů, paliva vody. Průtok kyslíku je řízen hmotnostním průtokoměrem (MFM) a pneumatickým proporcionálním ventilovým okruhem. Průtok paliva je řízen turbínovým kolem a motorem. Obvod nosného plynu je také řízen pomocí hmotnostního průtoku pro přesné řízení a sledování.



Obrázek 3.1 – Podavač prášku od firmy Praxair Model 1264

#### 4.1.1 Podavač prášku

Prívod prášku je realizován pomocí podavače. Podavač obsahuje násypu ve, které je naplněn práškový kov a odtud vlivem gravitace padá na proměnlivě otáčející podávací disk. Během provozu se plní otvory podávacího disku práškem. Rotace podávacího disku přivádí prášek do hadice a odtud putuje za pomoci nosného plynu argonu nebo dusíku k hořáku.



Obrázek 3.2 – Podavač prášku od firmy Praxair Model 1264

#### **4.1.2 Procesní parametry**

Nosný plyn je dusík nebo argon proudí do hořáku pod tlakem 6,8 bar při průtokovém množství 24 l/min. Kyslík je přiváděn do spalovací komory pod tlakem 14 barů při průtokovém množství 1117 l/min. Důležité je aby kyslík nepřišel do kontaktu s oleji a mastnotami, aby nedošlo k požáru nebo explozi. Spotřeba kerosinu se pohybuje okolo 30 l/h.

## **5 Mechanicko-fyzikální vlastnosti povlaků a jejich zkoušení**

### **5.1 Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti**

Tvrdost a mikrotvrdost je hlavním ukazatelem odolnosti povlaku vůči opotřebení. Zkoušky jsou snadno realizovatelné a mohou sloužit také k odhadu kvality nastříkaného povlaku. Většina měření se provádí na podélných průřezích povlaku, které se používají pro metalografické snímky. Je však možné provést měření i na příčných řezech a tvrdost se mohou lišit kvůli lamelární mikrostruktuře povlaku.

Standartní zkoušky tvrdosti povlaků žárových nástřiků se provádí dle Vickerse, méně používaná dle Knoop. Pro měření tzv. mikrotvrdosti se používá metoda dle Vickerse se zatížením do 10 N. Pro měření tvrdosti jednotlivých lamel je vhodné zatížení do 0,5 N.

## 5.2 Přílnavost povlaku k substrátu

Přílnavostí povlaku rozumíme odolnost vůči odtržení povlaku od substrátu. Vzhledem k tomu, že povlaky nemohou být přímo uchopeny, musí být použity jiné metody, aby bylo možné změřit adhezní pevnost. Nejběžnější používanou metodou je za pomoci epoxidového lepidla a tělíska přilepenému k povlaku.

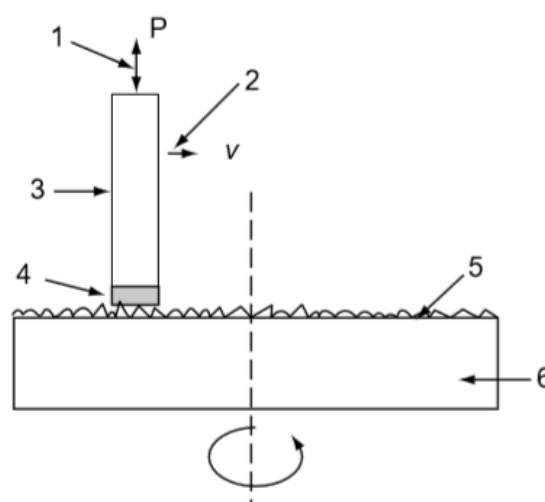
Postup zkoušky přílnavosti probíhá přilepením tělíska epoxidovou pryskyřicí, nebo jiným vhodným lepidlem k nanesenému povlaku. Spleené tělísko se upne do vhodného přípravku, který zajistí souosost. Samotná zkouška probíhá na trhacím stroji, jejímž výsledkem je trhací diagram. Z kterého je možné určit přílnavost povlaku [1] [2].

## 5.3 Odolnost vůči opotřebení

Opotřebení se projevuje jako nežádoucí změna tvaru nebo rozměru tuhého tělesa, která vzniká vzájemným působením mezi funkčními povrchy, nebo mezi povrchem a médiem. Opotřebení patří mezi nejčastější příčiny mechanických závad strojních součástí. Mezi mechanismy opotřebení patří abraze, adheze, koroze a difuze.

Povlaky žárových nástřiků podléhají nejčastěji abrazivnímu opotřebení. Jedná se o druh opotřebení povrchů, které kloužou přes sebe, přičemž jeden tvrdý materiál proniká do druhého měkčího materiálu a část ho unáší pryč.

Standartní zkouškou opotřebení žárových nástřiků je metoda Pin Up Disc. Princip metody je založený na tření povlaku o abrazivum. Nástřík je aplikován na čelo tyče, které při zkoušení tře o kotouč s abrazivem. Výsledky zkoušky se obvykle udávají jako objem nebo hmotnost opotřebovaného povlaku za určitou dráhu vykonanou při zkoušce [2].



Obrázek 4 – Schéma zkoušky Pin Up Disc: 1, přitlačná síla; 2, posuv; 3, substrát; 4, povlak; 5, abrazivo; 6, rotující disk [2]

## 5.4 Pórovitost

Mikrostruktury povlaků žárových nástřiků jsou velmi složité a zahrnují procesně závislé defekty, jako jsou globulární póry, interlamelární póry apod. Pórovitost je převládajícím znakem mikrostruktury a ovlivňuje širokou škálu vlastností povlaku, jako je

modul pružnosti, tepelná vodivost a dielektrické vlastnosti [1]. Pro kvantitativní měření pórovitosti jsou použity různé metody, které tvoří důležitou a nedílnou součást mikrostrukturní charakteristiky tepelně rozprašovaných povlaků. Norma ASTM E2109 – 01 uvádí dvě metody měření. Jedna metoda je založená na porovnávání metalografických snímků s příslušnými porovnávacími obrazy. Druhá metoda je založená na analýze obrazu pomocí výpočetní techniky. Tato metoda bude detailněji popsána v následující kapitole.

## **6 Přídavné materiály**

Hlavním faktorem vlastností povlaku vedle technologie je přídavný materiál. Materiály používané pro žárové nástřiky jsou především ve formě prášku, tyčinek a drátu.

### **6.1 Rozdělení přídavných materiálu dle formy**

#### **6.1.1 Přídavné materiály ve formě drátu**

Dráty jsou vyrobeny z kovů a jejich slitin a používají se především pro technologie nástřiku plamenem a nástřiku elektrickým obloukem. Obvykle jsou dráty vyrobeny v rozmezí s vnějším průměrem 2,4 až 5 mm. Mezi nejčastěji používané průměry drátů patří 3,18 a 4,76 mm. Důležitou výhodou přídavných materiálů jako drátu a tyčinek je to, že roztavené částice jsou téměř jednorozměrné. V důsledku toho jsou lamely uvnitř povlaků homogennější než lamely uvnitř povlaků, které jsou stříkány z prášku. Avšak způsoby nástřiku plamenem nebo elektrickým obloukem vytváření poněkud porézní povlaky, které značně snižují tuto výhodu [2].

#### **6.1.2 Přídavné materiály ve formě prášku**

Prášky pro žárové nástřiky se vyvinuly především z postupů práškové metalurgie. Nejnovější vývoj vznikl z technik zpracování keramiky a kompozitů. Výhodou práškové formy přídavného materiálu je ten, že téměř všechny materiály lze vyrobit v práškové formě. K výrobě kvalitního povlaku je nutné natavení částic přídavného materiálu. S tímto se přímo pojí velikosti částic přídavného materiálu. Obvyklá velikost částic se pohybuje v rozmezí od 5  $\mu\text{m}$  až 120  $\mu\text{m}$ , tato velikost je závislá na technologii nástřiku.

Práškové přídavné materiály se vyrábějí nejčastěji atomizací. Atomizace je technologie, kdy kontinuální proud tekutého kovu se rozpadá na kapičky nárazem do proudu studeného plynu nebo vody. Různé parametry procesu umožňují měnit velikost a distribuci velikosti částic. Touto technologií se vyrábějí zejména prášky na bázi kovů a jejich slitin [1].

Oxidy, karbidy a cermety mohou být vyrobeny slinováním nebo fúzí. Výsledné částice prášku jsou poměrně nepravidelné, což snižuje tekutost. Ke zlepšení tekutosti mohou být prášky podrobeny sféroidizaci plamenem nebo plazmatem. Podmínky sféroidizace však musí být pečlivě optimalizovány, aby se zabránilo tvorbě vnitřní pórovitosti, pokud to není žádoucí. Typické prášky připravených fúzí nebo slinováním jsou na bázi oxidu chrómu nebo karbidu wolframu s kobaltem [2].

## 7 Přídavní materiály pro HVOF

### 7.1 Specifikace materiálu WC-Co 83/17

Prášek je vyráběn metodou aglomerace a sintrace. Je vhodný pro nástřiky pomocí plasmy a metodou HVOF s kapalným nebo plynným palivem. Vytváří hladké povlaky s nízkou porozitou. Prášek je dostupný v pěti rozlišných frakcích velikostí zrn a to 63/32  $\mu\text{m}$ , 53/20  $\mu\text{m}$ , 53/10  $\mu\text{m}$ , 45/15  $\mu\text{m}$ , 30/5  $\mu\text{m}$ . Tloušťka nanášených povlaků by neměla přesáhnout 300  $\mu\text{m}$ . Chemické složení prášku je uvedeno v následující tabulce [8].

Tabulka 2 – Chemické složení prášku WC-Co 83/17 [8]

W	Co [%]	C [%]	Fe [%]
základ	15 - 18	4,9 – 5,3	0,20

Tento povlak s karbidem wolframu a kobaltu se využívá k povrchové ochraně vůči opotřebení a vykazuje také vysokou teplotní odolnost a nízký součinitel smykového tření, avšak nemá protikorozi vlastnosti. Nachází uplatnění v odvětvích leteckého, automobilového, těžebního a energetického průmyslu. Dále se například využívá pro povrchovou úpravu lopatek vodních turbín jako ochrana proti kavitaci [8].

Tabulka 3 – Vlastnosti povlaku WC-Co 83/17 [8]

Pórovitost	méně než 2%
Mikrotvrdost	až 1100 HV 0,1
Pevnost vazby	70 N/mm <sup>2</sup>
Maximální provozní teplota	540°C
Drsnost Ra	3 – 4,5 $\mu\text{m}$
Tvar zrn	převážně sférické

### 7.2 Specifikace materiálu WC-Co 88/12

Tento materiál ve srovnání s typickými WC-Co prášky vykazuje velmi jemné karbidy s průměrnou hodnotou velikosti 1,3  $\mu\text{m}$ . Prášek je vyráběn aglomerací a sintrací. Byl



vyvinut speciálně pro nanášení povlaků kerosinovými a moderními plynovými systémy HVOF a zajišťuje povlaky s nízkou porozitou. Prášek lze opatřit ve třech různých velikostech zrn a to 22/5  $\mu\text{m}$ , 38/15  $\mu\text{m}$ , 53/22. Chemické složení je uvedeno níže v tabulce [9].

Povlak zajišťuje odolnost vůči opotřebení a je možno ho leštit k dosažení lepších drsností ploch. Materiál také dobře odolává korozním podmínkám a vysokým teplotám. Díky dobré odolnosti vůči opotřebení a odolnosti vůči korozi, povlak nachází uplatnění pro povlakování rozmělnovacích válců papíren. Využívá se také pro povlakování měděných krystalizátorů pro kontilit [9].

Tabulka 4 – Chemické složení prášku WC-Co 88/12 [9]

W	Co [%]	C [%]	Fe [%]
základ	10,5 - 13	5,2 – 5,6	0,20

Tabulka 5 – Vlastnosti povlaku WC-Co 88/12 [9]

Pórovitost	méně než 2%
Mikrotvrdost	1100 - 1300 HV 0,3
Pevnost vazby	70 N/mm <sup>2</sup>
Maximální provozní teplota	540°C
Drsnost Ra	5 - 7 $\mu\text{m}$
Tvar zrn	převážně sférické

### 7.3 Specifikace materiálu WC-CoCr 86/10/4

Tento produkt obsahuje asi 10 % kobaltu a 4% chromu. Používají se různé velikosti karbidu wolframu, které jsou uloženy v Co-Cr matrici. Prášek je určen pro ukládání povlaku pomocí plazmy a technologií HVOF. Při použití technologie HVOF povlak poskytuje až 5x zvýšenou odolnost proti opotřebení a erozi oproti nástřiku plazmou. Výhodou povlaku je možné broušení brusivem na bázi diamantu a tím dosažení lepší drsnosti povrchu Ra [10].

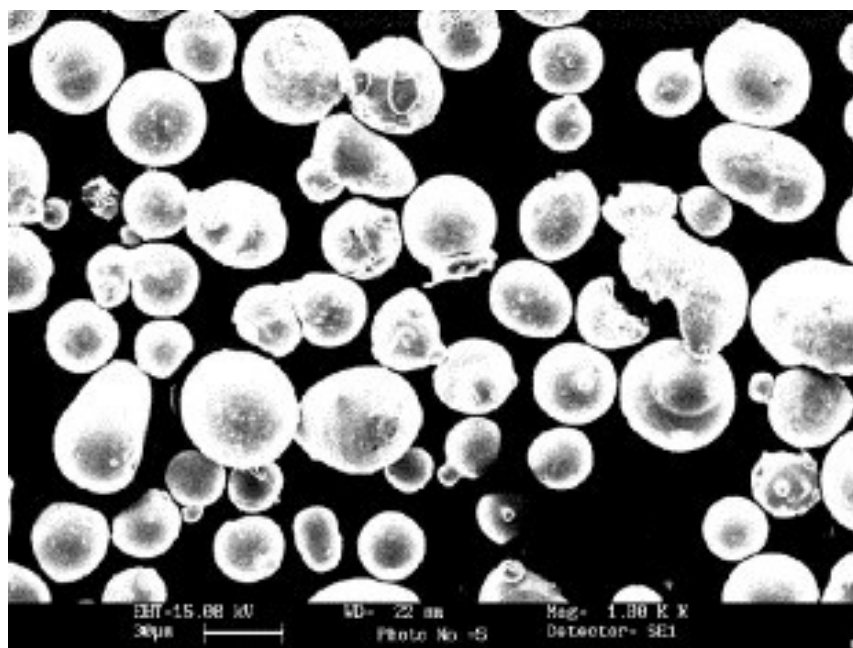
Tabulka 6 – Chemické složení prášku WC-CoCr 86/10/4 [10]

W	Co [%]	C [%]	Fe [%]	O [%]
základ	9 - 11	5 – 6	max 0,3	max 0,2

Povlak je vhodný pro ochranné funkce v korozním prostředí. Využívá se pro ochranu lopatek čerpadel a kompresorů pro výbornou odolnost vůči kavitaci, dobrou odolnost vůči korozi a opotřebení. Dále je nanášen na ventily a sedla ventilů, vysokotlaké plunžry a je vhodný pro nespočetné množství opotřebitelných součástí v odvětví těžby [10].

#### 7.4 Specifikace materiálu Stellite 6

Jedná se o prášek na bázi kobaltu, který je široce používán v jak v novém výrobním, tak renovačním průmyslu. Prášek obsahuje částice, které mají sférickou morfologii s dendritickou strukturou a největší částice jsou menší než 44  $\mu\text{m}$  (obrázek 2.) [10]. Povlaky nastříkané práškem Stellite 6 vykazují dobrou odolnost proti korozi, opotřebení a oděru. Stellite 6 obsahuje především legující prvky, jako wolfram, chrom, křemík a určité množství uhlíku. Chrom je hlavní legující prvek, který reaguje s uhlíkem za vzniku tvrdého mezidendritického karbidu. Legující prvky wolfram a křemík také reagují s uhlíkem za vzniků karbidů jako sekundárních částic. Rozložení, velikost, a tvar karbidů jsou určeny procesními podmínkami a ovlivňují mechanické vlastnosti a tvrdost [11][12][13].



Obrázek 5.1 – Mikroskopický snímek prášku Stellite 6 [14]

Prášky typu Stellite 6 se nanáší zejména na nerezové oceli, které se používají ve vysokoteplotním a vysokotlakém prostředí, kde materiál může podléhat natavení, creepu, nebo jiné degradaci [15]. Legující prvek Cr vykazuje dobrou odolnost vůči opotřebení, korozi a pevnost při vysokých teplotách. Bylo dokázáno, že oxidy vytvořené za vysokých teplot snižují opotřebení a slouží jako ochranná fólie mezi kontaktními oblastmi [16][17].

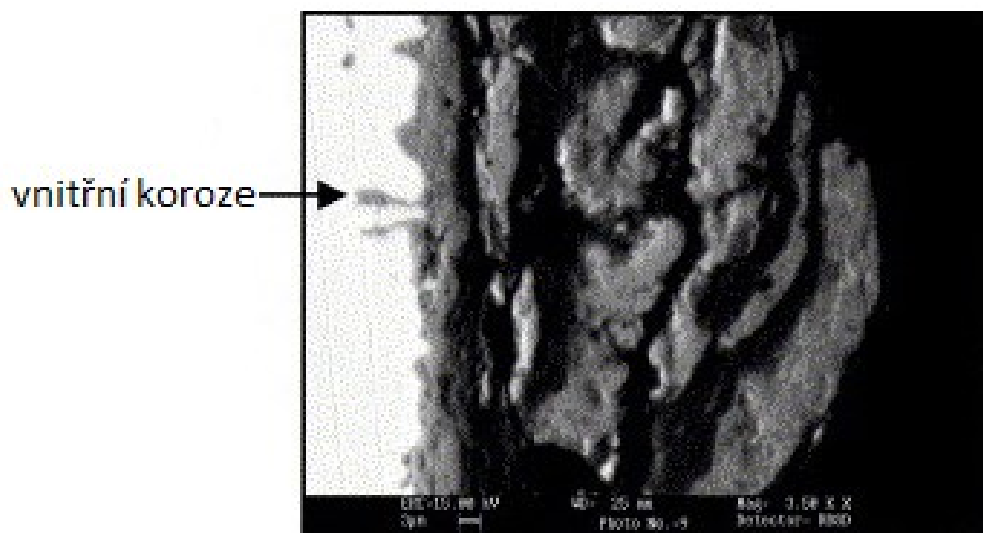
Tabulka 7 – Chemické složení prášku Stellite 6 [17]

Co	Cr [%]	C [%]	Si [%]	W [%]	Ostatní prvky
základ	26,5 – 29,5	0,9 – 1,4	0,5 – 1,5	3,0 – 5,0	Fe, Ni, Mo, Mg

#### 7.4.1 Uplatnění stellite 6 jako ochrany vůči horké korozi v prostředí kotlových trubek

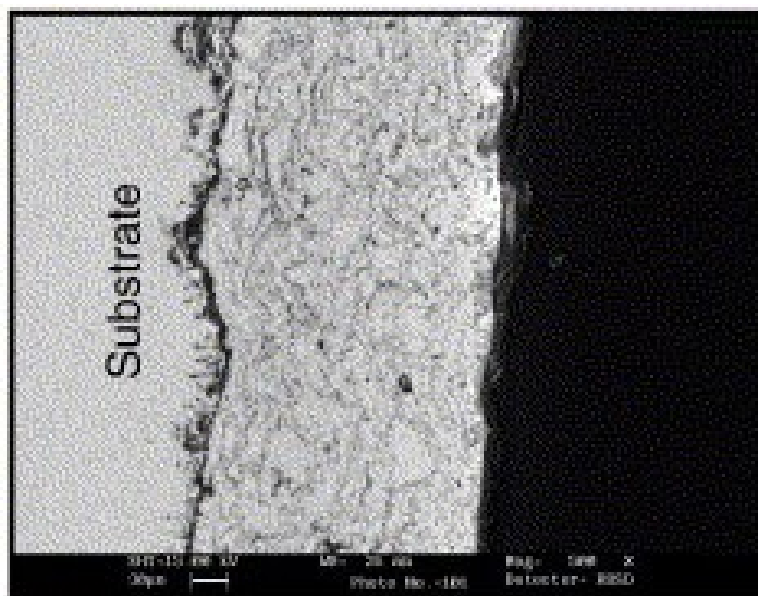
Horká koroze kotlových trubek používaných v parních generátorech je vážný problém, který vede ke ztenčení stěn trubek a předčasnému selhání parních systémů. Spalováním uhlí se vytváří silná korozní média, která obsahují síran sodný a síran draselný. Tyto soli kondenzují při provozních teplotách na stěnách trubek a způsobují silnou korozi. Jednou z možností jak trubky chránit je vytvoření ochranného povlaku na povrchu trubky. Jako ochranný povlak je možné použít Stellite 6 nastříkaný metodou HVOF [18].

Kotlové trubky vyrobené z materiálu Superni 7 bez ochranného povlaku vystavené teplotě 900 °C vykazují po již 100 hodinách provozu první příznaky koroze. Po 1 000 hodinách se již objevuje i vnitřní koroze, zasahující do hloubky 10 µm (obrázek 5.1) [18].



Obrázek 5.2 – Mikroskopický snímek řezu kotlové trubky po 1 000 hodinách při provozu za teploty 900 °C [18]

Při nanesení ochranného povlaku Stellite 6 trubky po 1 000 hodinách při teplotě 900 °C nevykazují žádné známky vnitřní koroze, nedochází ke ztrátě přilnavosti povlaku a neobjevují se žádné trhliny (obrázek 3.2). Korozivzdornost zajišťuje ochranný oxidický film tvořený oxidy chromu a křemíku na povrchu povlaku. Oxidy utěsňují póry v povlaku a zabraňují šíření povrchové koroze skrze povlak [18].



Obrázek 5.3 – Mikroskopický snímek řezu kotlové trubky s povlakem Stellite 6 po 1 000 hodinách při provozu za teploty 900 °C [18]

## 7.5 Specifikace Woka 3300

Produkt od firmy Oerlikon názvem Woka 3300 je prášek vyroben aglomerací a sintrací. Prášek obsahuje z 90% tvrdou fázi karbidu wolframu se středně velkými karbidovými zrny a 10% niklu jako pojivového kovu. Povlaky tohoto prášku vykazují značnou odolnost vůči frettingu a abrazi v suchém prostředí. Jeho použití se však nedoporučuje nad teplotu 500 °C, aby se zabránilo oxidaci karbidů wolframu. Korozní odolnosti WC-Ni povlak jsou obecně lepší než povlaky na bázi WC-Co, navíc absence kobaltu umožňuje použití těchto povlaku v radioaktivních podmínkách [19].

Tabulka 8 – Chemické složení prášku Woka 3300 [19]

W	C [%]	Ni [%]	Si [%]	W [%]
základ	5,2 – 6,0	8,5 – 11,5	0,5 – 1,5	3,0 – 5,0

## 8 Metody měření pórovitosti

Žárové nástřiky jsou náchylné k tvorbě pórovitosti v důsledku nedostatečné fúze mezi rozstříkanými částicemi nebo expanzí plynů vznikajících při nástřiku na povrch. Stanovení pórovitosti plochy je důležité, aby bylo možné sledovat vliv variabilních parametrů procesu žárového nástřiku a vhodnost povlaku pro zamýšlený účel.

## 8.1 Metodika dle normy ASTM E2109 – 01

ASTM E2109 – 01 udává dvě metody, kterými se dá pórovitost žárových nástřiků určit:

- Metoda A je přímá porovnávací metoda využívající sedmi standardních obrazců, které znázorňují typické rozdělení pórovitosti v žárovém nástřiku.
- Metoda B je automatizovaná technika vyžadující použití počítačového analyzátoru obrazu.

Tyto metody kvantifikují plošnou procentuální pórovitost pouze na základě reflexe světla z metalograficky leštěného povrchu.

Osoba, která využívá těchto zkušebních metod, musí být obeznámena s vizuálními vlastnostmi žárových nástřiků a být schopna určit rozdíly mezi vlastní porézností a oxidy. Zkoušející si musí být vědom možných typů zkreslení, které mohou být vytvořeny během dělení a přípravy vzorků. Pokud existují pochybnosti ohledně rozlišení pórů a ostatních fází v samotném nástřiku, je doporučeno využít energicky disperzní spektroskopii (EDS), nebo vlnovou disperzní spektroskopii (WDS) pro jednoznačné rozlišení fází od pórů [20].

## 8.2 Odběr vzorků

V praxi se výrobce a kupující dohodnou na místě a počtu zkušebních vzorků. Vzorky mohou být metalograficky oddělené od skutečných výrobních kusů, nebo mohou být zhotoveny zkušební panely složené z reprezentativních substrátů s identickými výrobními parametry nástřiku.

Vzorky je nutno vybrousit a následně vyleštit pro zobrazení struktury nástřiku. Délka povlaku obsažená ve snímku by měla být přibližně 25 mm. Pro stanovení homogenity povlaku se může volit několik vzorků. Například je možno vybrat jeden vzorek ve středové horní části a druhý vzorek ve středové dolní části z pořízeného snímku [20].

## 8.3 Příprava vzorků

Příprava vzorků může způsobit poškození povlaku, nebo mohou vzniknout zkreslení na leštěném povrchu, které mohou vést ke zkreslení analýzy výsledků. Leštěný povrch musí jasně odhalit rozdíly mezi vlastní pórovitostí, cizí hmotou, poškrábáním a oxidy. Je doporučeno používat automatické brusné a lešticí zařízení, naopak manuální způsoby metalografické přípravy se nedoporučuje. Pro jasnější rozlišení mikrostruktury je možné použít barevné epoxidové nebo fluorescenční přísady. To může eliminovat jakékoliv nesrovnalosti týkajících se obsahů oxidů nebo pórů.

## **8.4 Postup měření**

### **8.4.1 Metoda porovnávací**

Správně připravený vzorek se vloží do mikroskopu a snímek je přesměrován na místo, které má být měřeno. Zvětšení se volí, tak aby snímek obsahoval celou tloušťku povlaku. Často je však nutno dosáhnout kompromisu, kdy celková tloušťka povlaku není viditelná, ale redukcí zvětšení je odstraněna vnější nepravidelná linie povlaku. Důležitější je zbavení snímků dutin vzniklé drsností na rozhraní povlaku, které výrazně přispívají k celkovému procentu oblastí pórovitosti. Během této analýzy musí být zkoušející schopen rozlišit rozdíl mezi oxidy a epoxidem proniklým do prázdných míst.

Dalším krokem je srovnání s vzorku s normalizovanými obrazci. Snímek vzorku se srovná se sedmi obrazci a zaznamená se hodnota pórovitosti dle nejpriznivějšího normalizovaného obrazce. Pokud je vzorek nerozhodný, může být hodnota pórovitosti zaokrouhlena na nejbližší celé číslo mezi hodnotami pórovitosti normalizovaných obrazců. Například, pokud pórovitost v současném zorném poli spadá mezi obrazec 4 a 5 představující hodnoty pórovitosti 5,0 % a 8,0 %, mohou být použity zaokrouhlené hodnoty 6,0 % nebo 7,0 % [20].

### **8.4.2 Metoda analýzy obrazu**

Připravený vzorek se vloží do mikroskopu a snímek se nasměruje na místo povlaku. Zvětšení je voleno, které umožňuje rozlišení dutin a nejlépe vyplní obraz s celou tloušťkou povlaku. Pokud je na obrazovce vidět část podkladu nebo držáku musí být maskována způsobem, který jej eliminuje z celkové plochy použité pro výpočet procentuální pórovitosti plochy. Ve většině případů je však nutno přistoupit ke kompromisu, kdy není zobrazena celková tloušťka povlaku, ale sníží se riziko detekce dutin významné velikosti. Je důležitější snímek zbavit dutin vzniklé rozhraním povlaku, které celkově významně přispívají k celkovému obsahu pórovitosti a tím zatěžují měření značnou chybou. Po určení nejlepšího zvětšení, následuje nastavení clony a polní clony mikroskopu pro nejlepší rozlišení.

Dalším krokem je segmentace obrazu prahováním, to je funkce obrazové analýzy, která převede šedý nebo barevný obraz na obraz binární. Při vymezování pórovitosti je nutno dbát na to, aby do hodnoty pórovitosti nebyly započítané mezi oxidy nebo jiné prvky blízké prahové hodnotě pórovitostní limity.

Často se začnou detekovat rozhraní povlaků a oxidů z důvodu blízké prahové hodnotě. Tento jev je nazývaný jako Halo efekt. Tomuto se dá zabránit morfologickou operací

známou jako otevření. Otevření je proces tvořen kombinací elementárních operací eroze a dilatace, ve kterém je vrstva pixelů odstraněna z obvodu každého objektu reprezentovaného v binárním obrazu a potom je vrstva obrazových bodů přidána zpět do obvodu všech zbývajících objektů. Žádoucím účinkem je, že z obrazu mohou být zcela odstraněny velmi malé a velmi tenké předměty, zatímco velké předměty zůstanou a zůstanou v blízkosti původních rozměrů [20].

Je možnost použití alternativních mikroskopických technik na příklad tmavé pole, polarizované světlo nebo fluorescence k snadnějšímu rozpoznání pórů.

## 9 Postup přípravy vzorků dle Struers

Firma Struers zabývající se výrobou metalografických nástrojů uvádí doporučený technologický postup, pro přípravu metalografických vzorků se zaměřením na měření pórovitosti.

- Namontovat vzorek v Durofastu nebo jiným vhodným materiálem s povlakem kolmým na leštící rovinu.
- Vložit tři držáky do držáků vzorků.
- Umístit povlak směrem ke středu držáku s povlakovanou plochou kolmo na poloměr držáku.
- Po každém kroku opláchnout vzorky vodou.

Tabulka 9 – Doporučené parametry při broušení vzorků pro vyhodnocení pórovitosti dle Struers

Krok č.	Velikost zrn [μm]	Síla držáku, pro 3 vzorky [N]	Čas [sec]	Otáčky [ot/min]	Lubrikant	Leštící plátno	Komentář
1	120	150	každý kotouč 30	300	Voda	-	Odstranit 1/16" materiálu
2	240	150	15	300	Voda	-	Použít jeden brusný kotouč
3	320	150	15	300	Voda	-	Použít jeden brusný kotouč
4	400/800	150	15	300	Voda	-	Použít jeden brusný kotouč
5	600/1200	150	15	300	Voda	-	Použít jeden brusný kotouč
6	2400	150	15	300	Voda	-	Použít jeden brusný kotouč



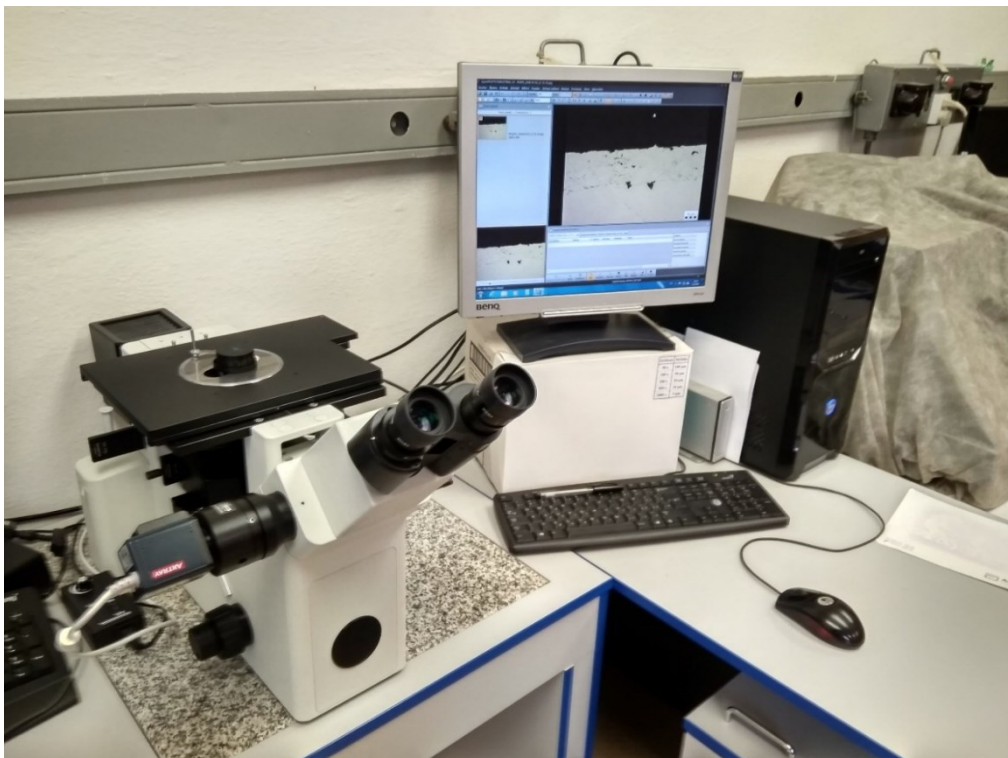
7	6	200	30	150	Struers zelený nebo modrý	Struers MD- Plan nebo DP- Plan	Před začátkem přidat lubrikant a diamant a poté přidávat každé 2-3 sekundy lubrikant a diamant každých 5 sekund.
8	1	200	30	150	Struers zelený nebo modrý	Struers MD- Plan nebo DP- Plan	Před začátkem přidat lubrikant a diamant a poté přidávat každé 2-3 sekundy lubrikant a diamant každých 5 sekund.

## 10 Experimentální část

Cílem experimentu bylo metalografické šetření naneseného nástřiků provedeného metodou HVOF a elektrickým obloukem na daný substrát vysokolegované uhlíkové oceli. Ověřované nástřiky byly z prášků od firmy Praxair a Woka. Od firmy Praxair byly zkoumány prášky s označením WC–724/1310VM a prášek komerčního názvu Stellite 6. Od firmy Woka, byl zkoumán prášek s označením 3300. Při nástřiku elektrickým obloukem byl použit přídatný materiál odpovídající chemickému složení oceli 17 153 ve formě drátu. Pro nástřik bylo použito zařízení Praxair JP 5000 a 8000, pro nástřik elektrickým obloukem zařízení JP 2000. Výrobní parametry nástřiku byly nastaveny dle pokynů výrobců přídatných materiálů.

### 10.1 Návrh experimentu

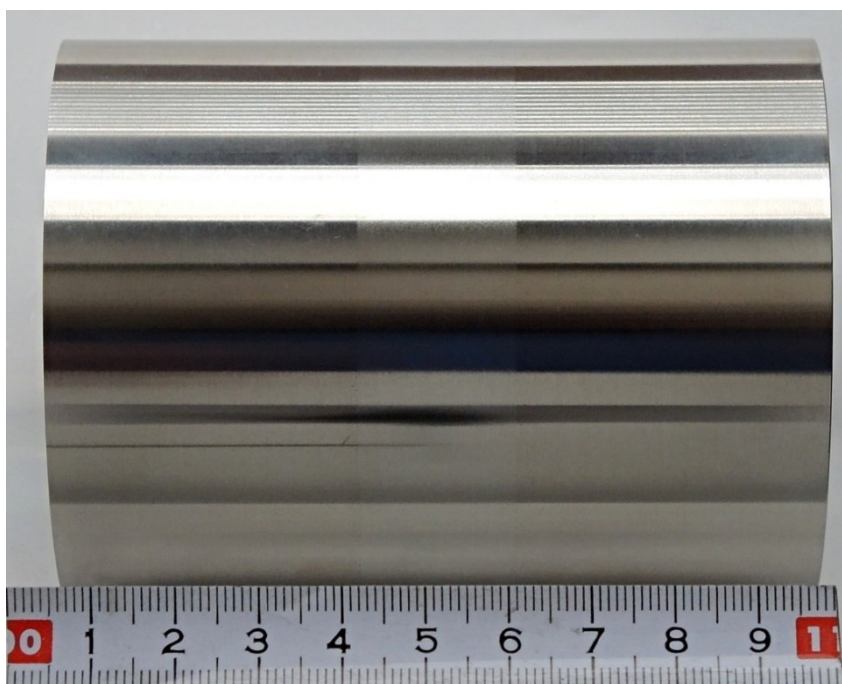
Vyhodnocení mikrostruktury bylo provedeno za pomoci světelné mikroskopie získané světelným mikroskopem Olympus GX51, záznam byl proveden pomocí softwaru QuickPhoto industrial 3.1. Měření tloušťky vrstvy nástřiku bylo provedeno na snímcích pro vyhodnocení mikrostruktury. Tloušťka byla měřena v řezu s využitím softwaru QuickPhoto industrial 3.1. Měření pórovitosti bylo taktéž provedeno na předešlých snímcích pro vyhodnocení.



Obrázek 6 – Optický mikroskop Olympus GX51

## 10.2 Zkušební vzoreky

Zkušební vzorek byly k dispozici ve tvaru dutého válce o rozměrech  $\phi 60 \times 80$  mm s vnitřním  $\phi 50$  mm. Povrch vzorku byl tryskán, následně byly zhotoveny nástriky. Základní materiál byla vysokolegovaná ocel dle ČSN 10 027-1 X6CrNiTi8-1, dle starého značení ČSN 42 0002 se jedná o ocel 17 247.



Obrázek 7 – Vzorek s nástrikem s označením Stellite 6

### 10.3 Příprava vzorků

Vzorky pro optickou mikroskopii byly připraveny na kotoučové řezačce Struers Discotom 6. Samotné řezání bylo doprovázeno chlazením. Chlazení bylo použito, z důvodu minimalizování tepelného ovlivnění metalografické struktury vzorků.

Následovně byly vzorky po hrubém dělení broušeny na brusce Struers tegra force 5 (obrázek 5.2). Pro broušení byly použity brusné disky MD-Piano 220, Largo o zrnitosti 9  $\mu\text{m}$  a následovně MD-Piano 4000. Brusné disky byly použity od největší zrnitosti až po tu nejmenší. Po každém broušení byly vzorky očištěny od nečistot, a aby se zamezilo případnému přenosu zrn z brusných disků do dalšího procesu broušení. První a druhé broušení bylo provedeno, při brusném programu Primo, které trvalo 1 minutu 30 sekund. Poslední dokončovací operace jako leštění bylo provedeno ručně.



Obrázek 8 – Bruska Struers tegra force 5

### 10.4 Vyhodnocení mikrostruktury povlaku a pórovitosti

Na snímcích mikrostruktury při zvětšení x50 u vzorků 1 – 4 jsou vidět póry, oxidy, a vměstky (černé skvrny) při zvětšení x50. Při zvětšení x200 jsou pozorovatelné u vzorků 1 – 3 kapky tzv. „splaty“. Přičemž mikrostruktura vzorků 1 – 2 je velmi podobná v důsledku stejného chemického složení použitých prášků. Na snímcích 1 – 4 se neobjevili žádné trhliny v povlaku. Mikrostruktura vzorku č. 4 obsahuje delší lamely než u vzorků 1 –

3 vlivem použití technologie nástřiku pomocí elektrického oblouku a přídavného materiálu ve formě drátu.

Měření pórovitosti proběhlo na snímcích se zvětšením x200 dle normy ASTM E2109 – 01 metodou obrazové analýzy. Na snímcích se nacházejí kromě pórů i další vady, jako oxidy, vměstky, neroztavené částice trhliny a cizí částice. Tyto částice je třeba rozlišit před obrazovou analýzou snímků. K znehodnocení měření může dojít hrubým broušením, které může vytrhat částice nástřiku, proto se doporučuje zařazení jemného ručního broušení. Vady vzniklé nesprávnou přípravou vzorků, mohou výsledek pórovitosti skreslit i o několik procent.

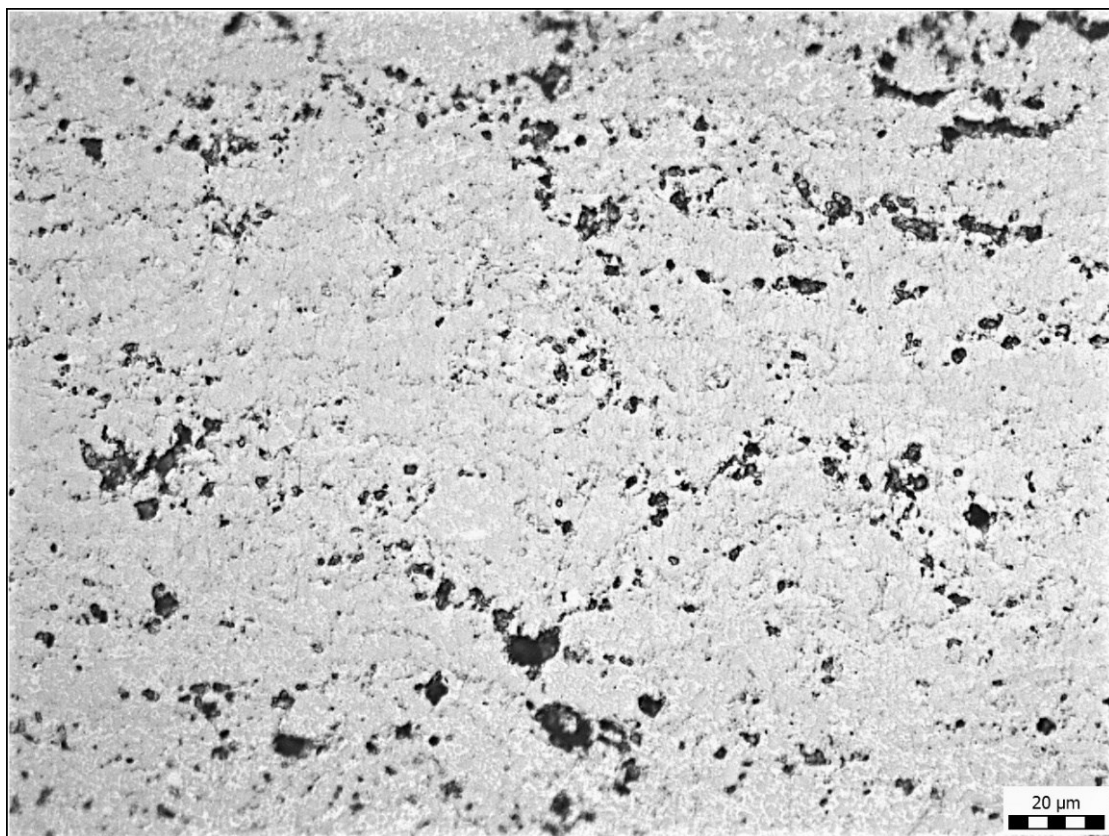
Červená místa na obrázcích 6.3, 6.6, 6.9, 6.13 byly označeny za póry a pomocí příslušného softwaru byla vypočítána jejich plošná hustota v procentech. Hodnoty pórovitosti jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 9 – Hodnoty naměřených pórovitostí na jednotlivých vzorcích

Vzorek č.	1	2	3	4
Označení přídavného materiálu	Praxair 1310VM	Woka 3300	Praxair Stellite 6	Praxair 89 MXC
Hodnoty pórovitosti [%]	2,79	1,71	1,71	1,27

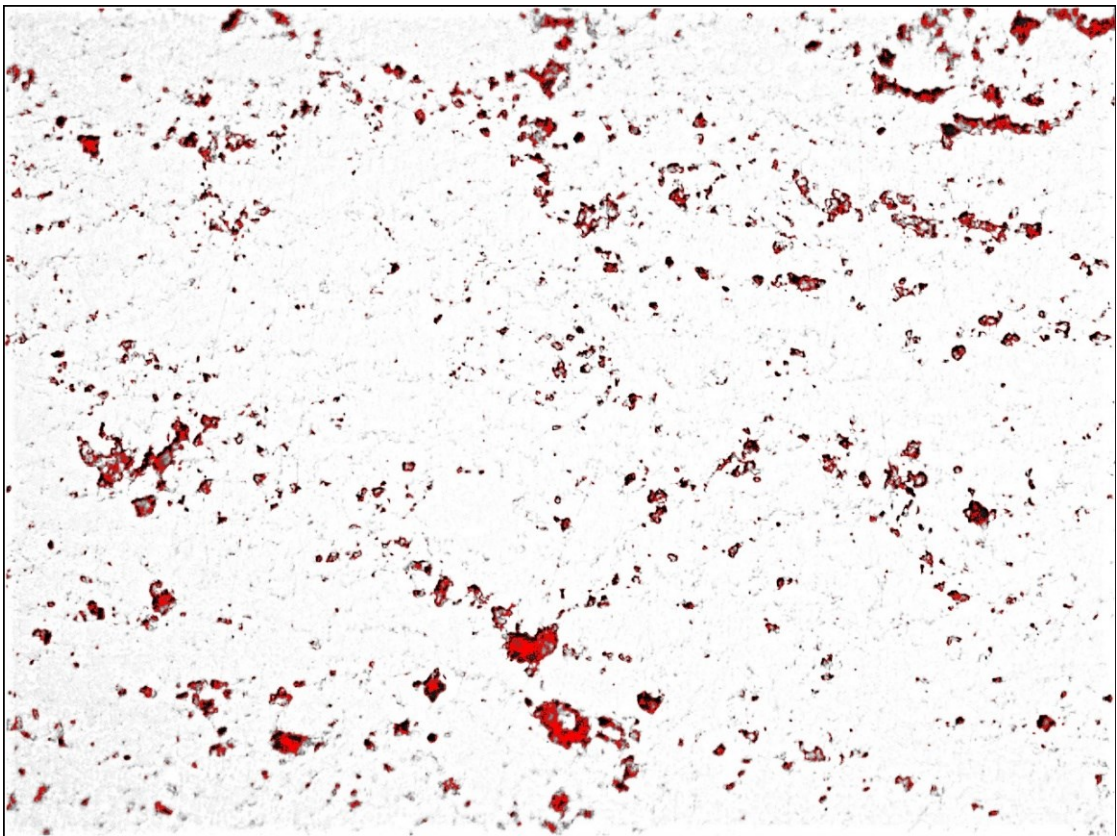


Obrázek 9.1 – Vzorek č. 1 zvětšení x50

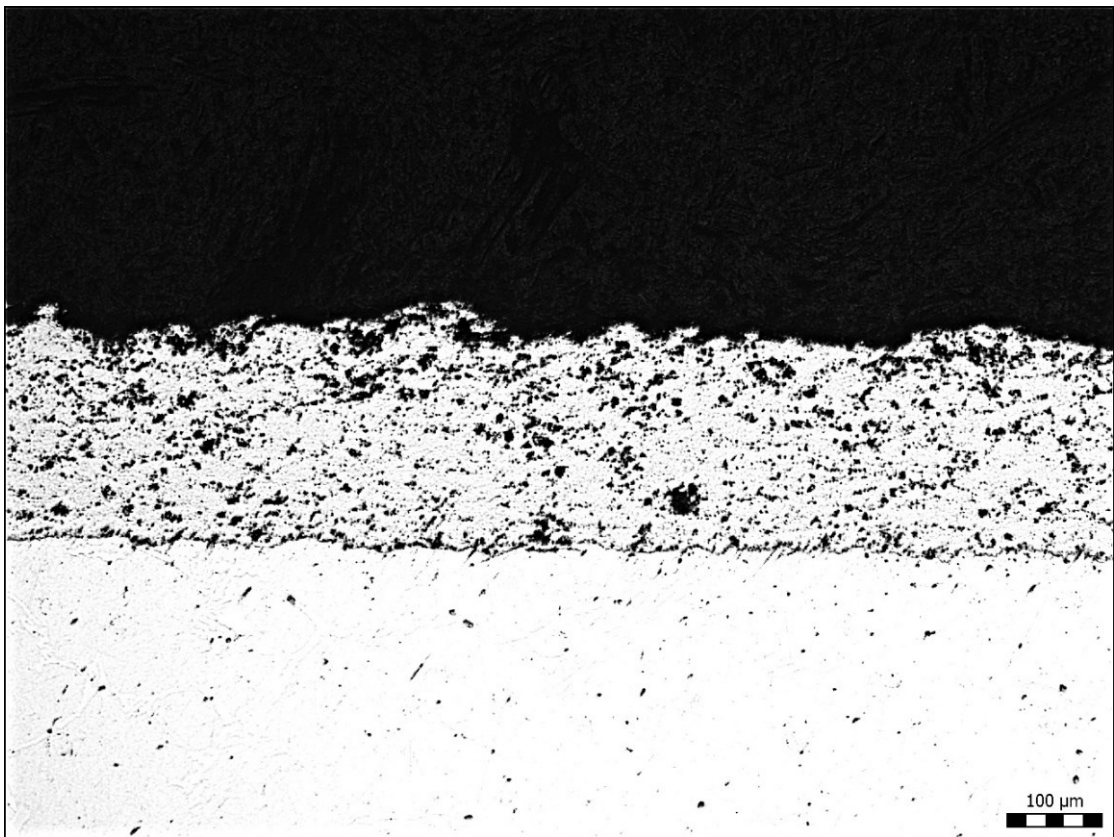


Obrázek 9.2 – Vzorek č. 1 zvětšení x200



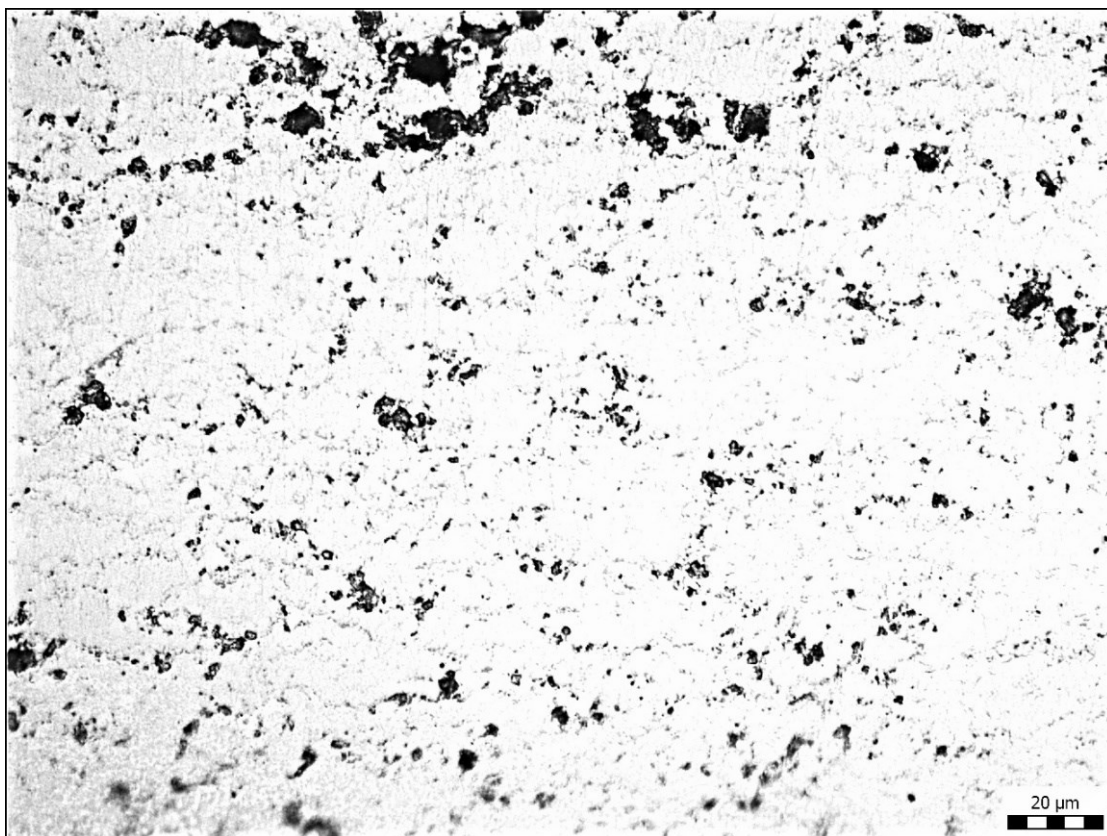


Obrázek 9.3 – Měření pórovitosti vzorku č. 1

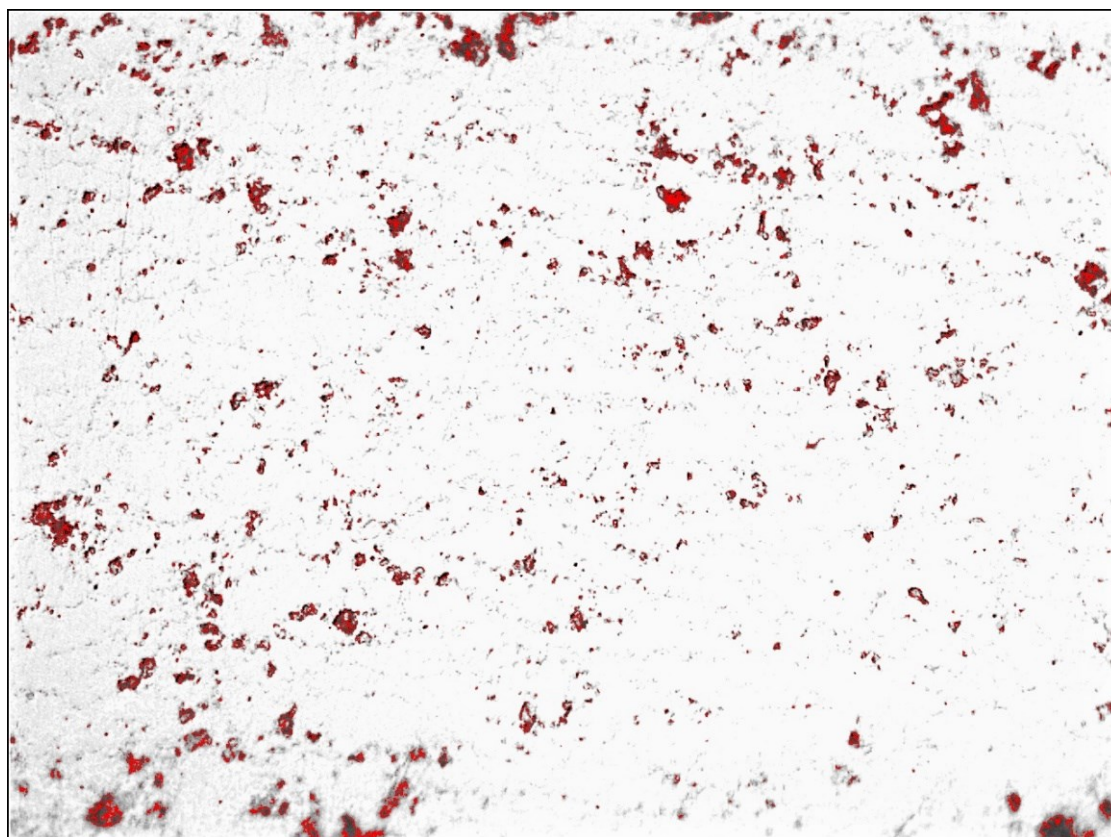


Obrázek 9.4 – Vzorek č. 2 zvětšení x50



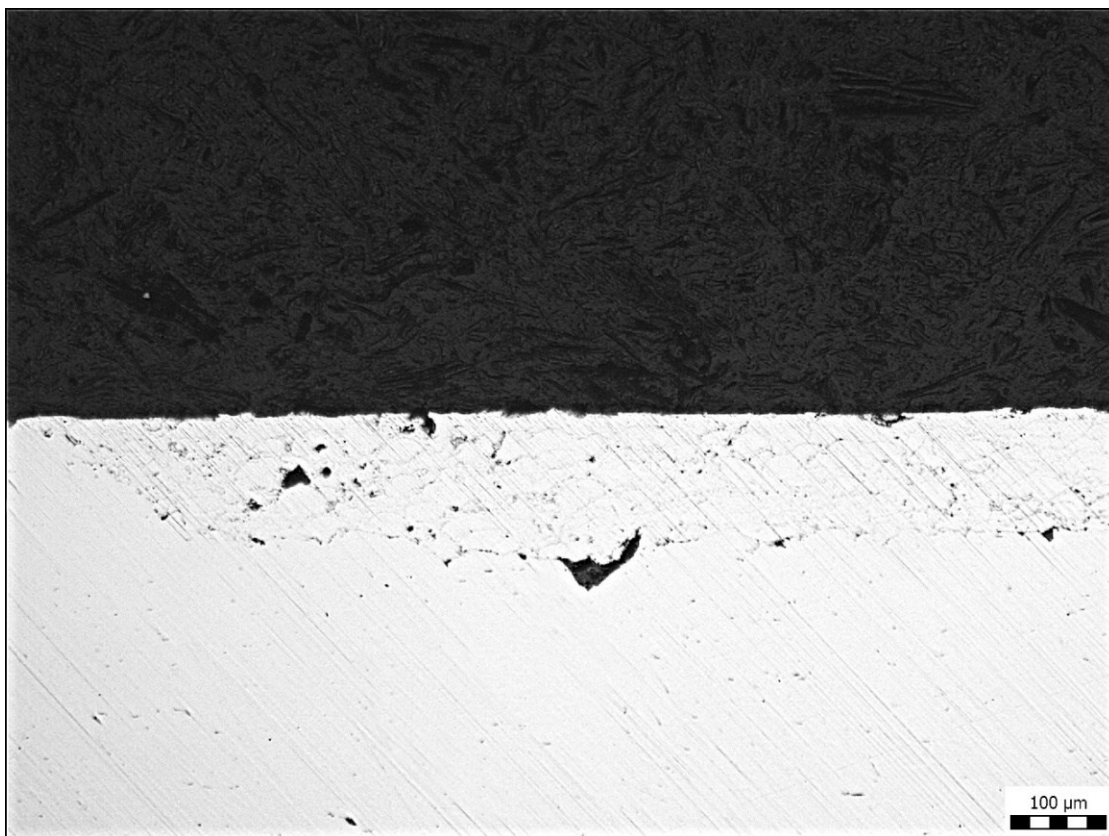


Obrázek 9.5 – Vzorek č. 2 zvětšení x200

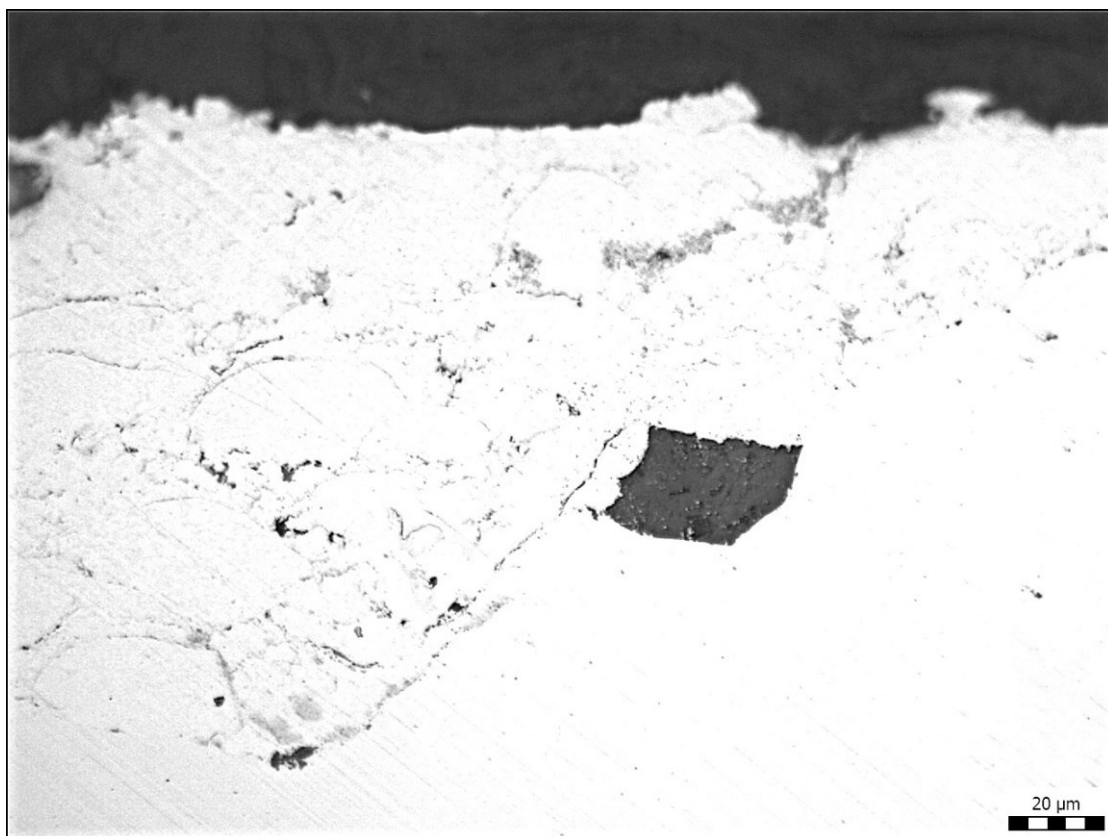


Obrázek 9.6 – Měření pórovitosti vzorku č. 2

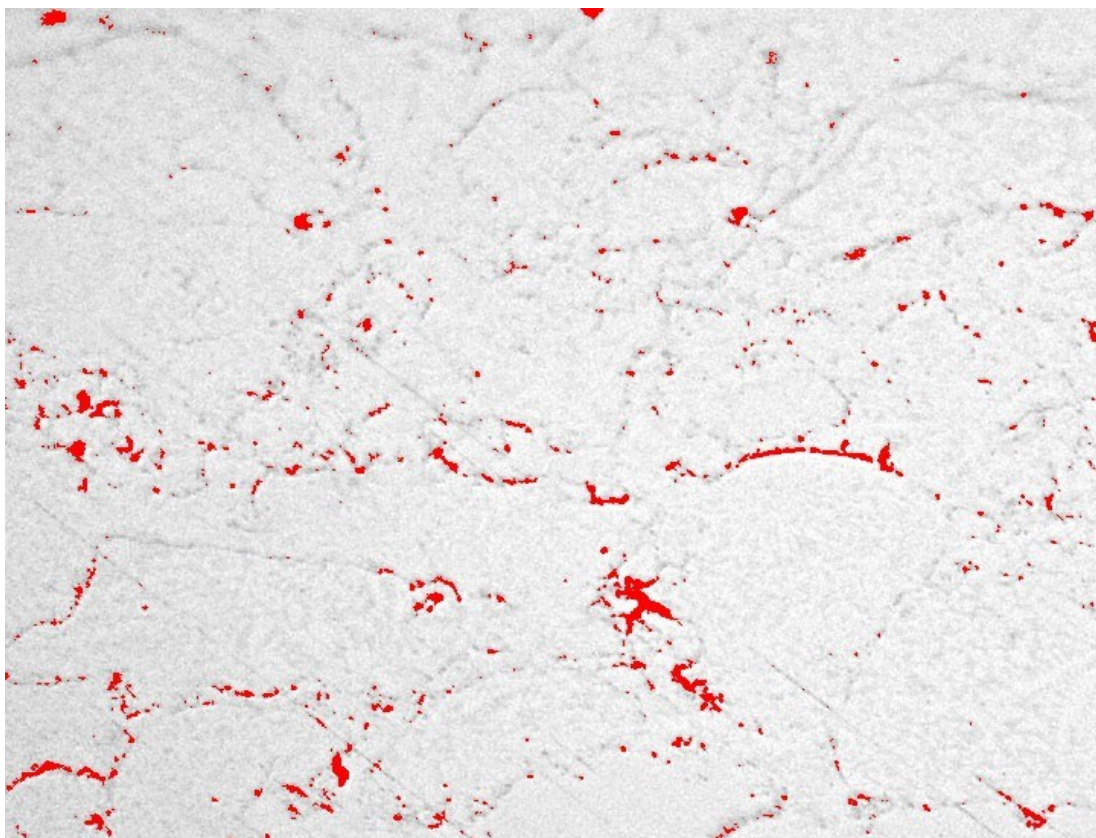




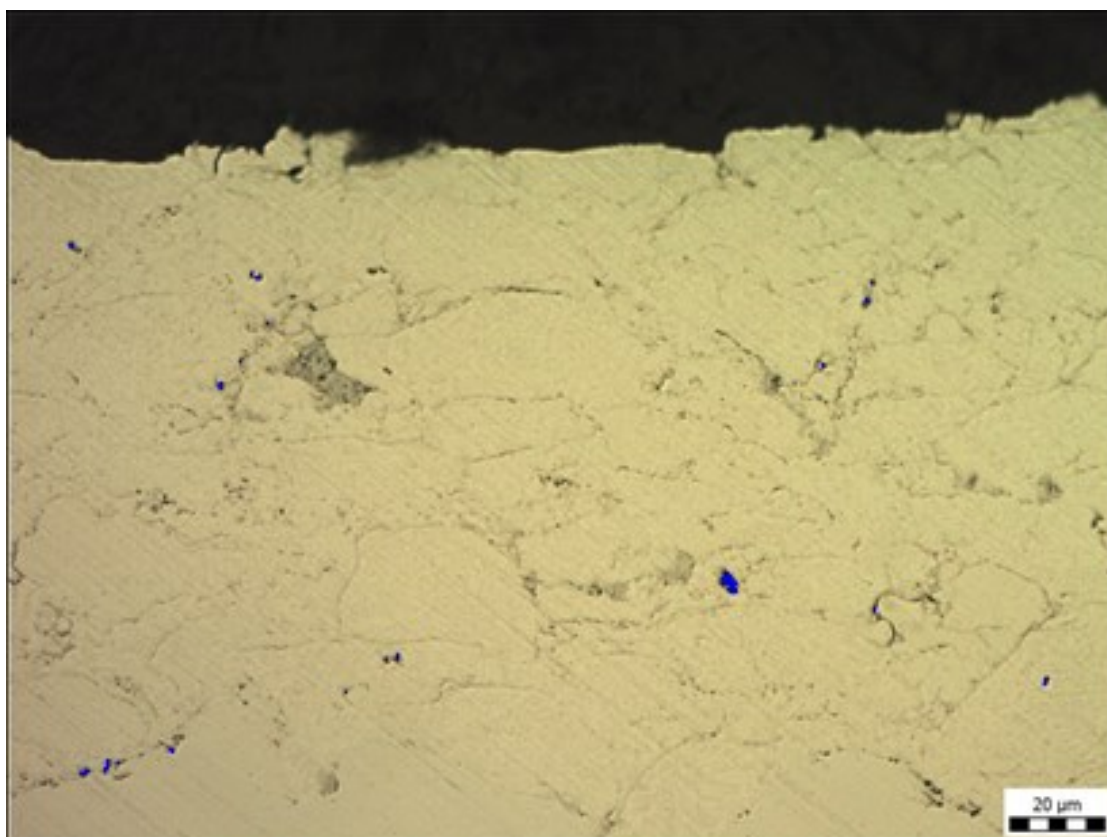
Obrázek 9.7 – Vzorek č. 3 zvětšení x50



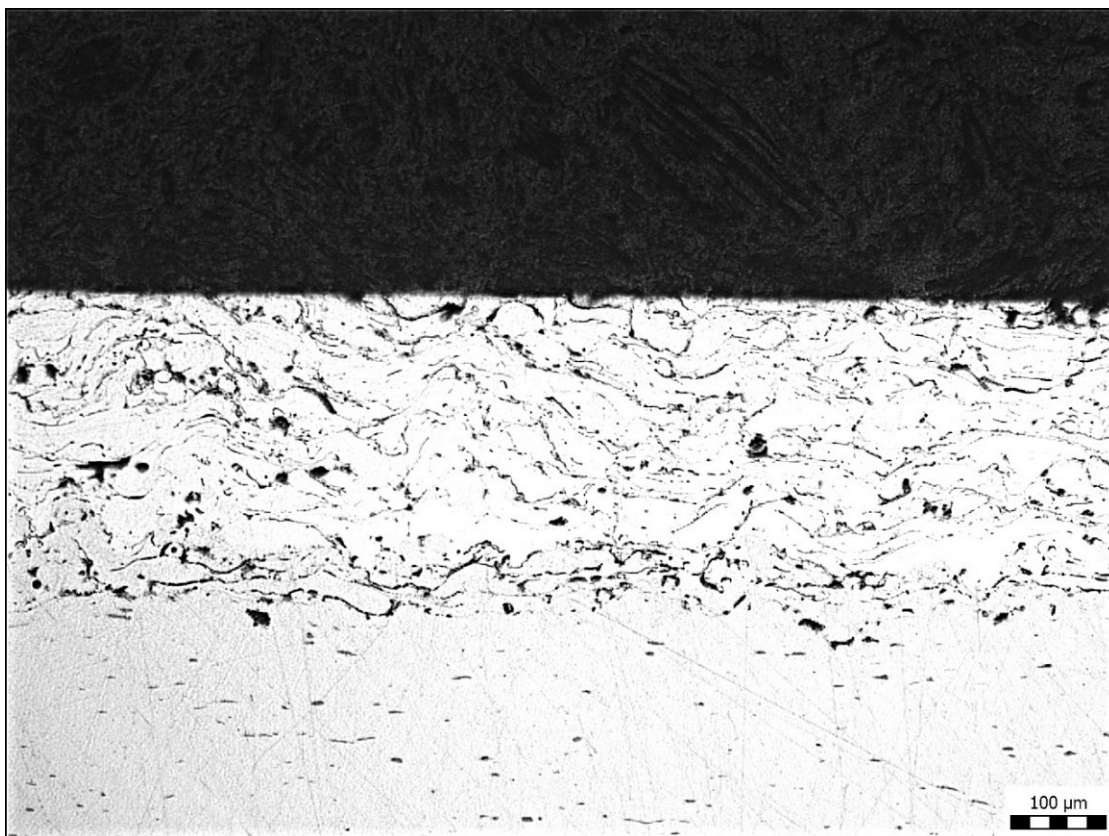
Obrázek 9.8 – Vzorek č. 3 zvětšení x200



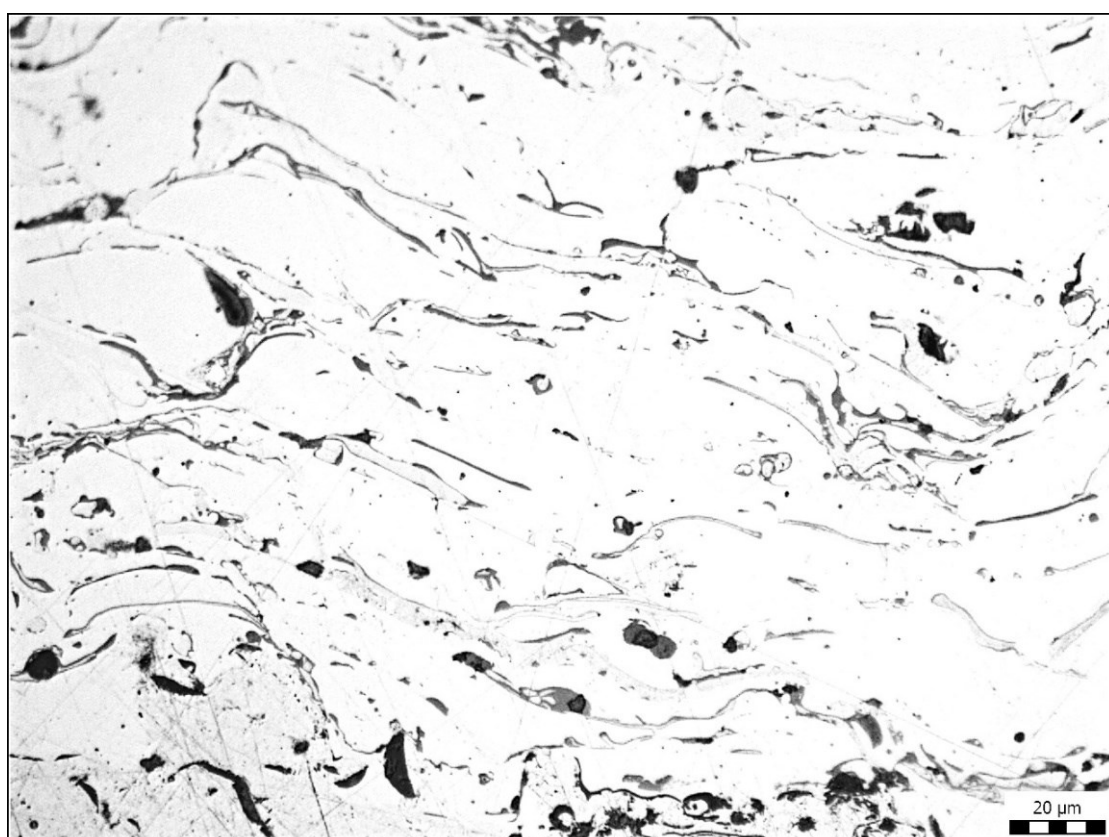
Obrázek 9.9 – Měření pórovitosti vzorku č. 3



Obrázek 9.10 – Měření pórovitosti Stellite 6 po ručním broušení

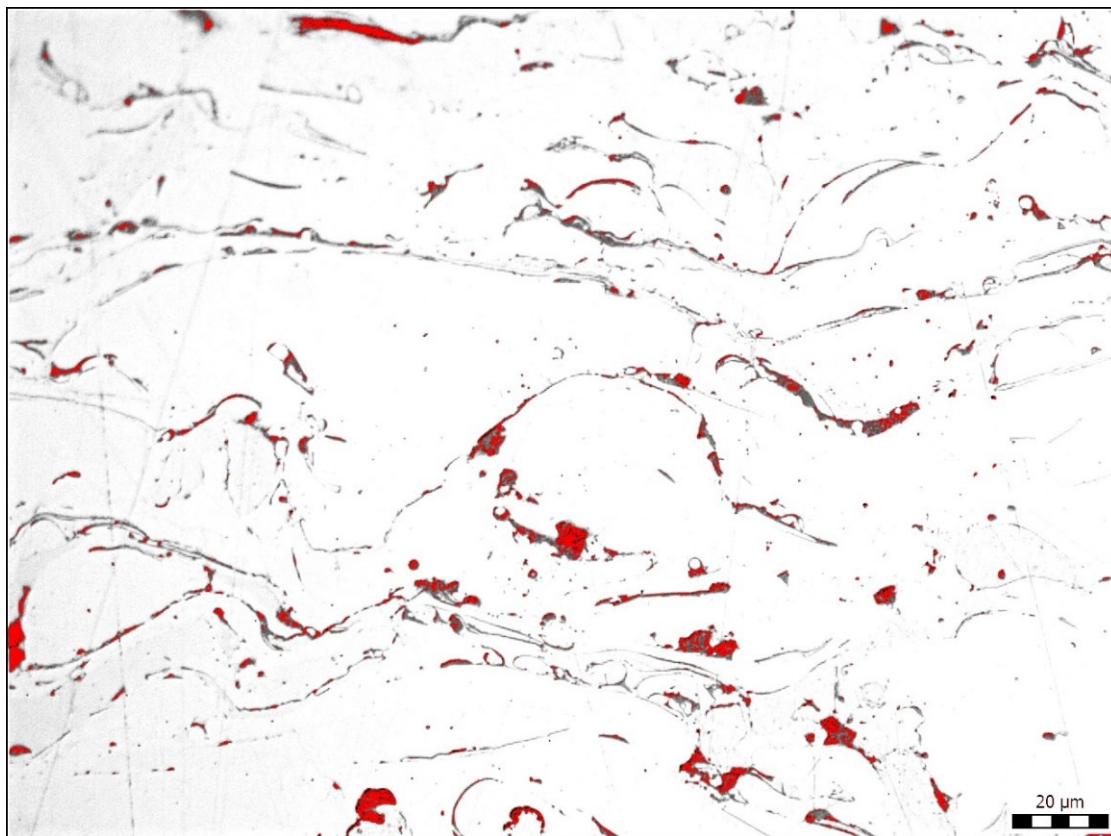


Obrázek 9.11 – Vzorek č. 4 zvětšení x50



Obrázek 9.12 – Vzorek č. 4 zvětšení x200

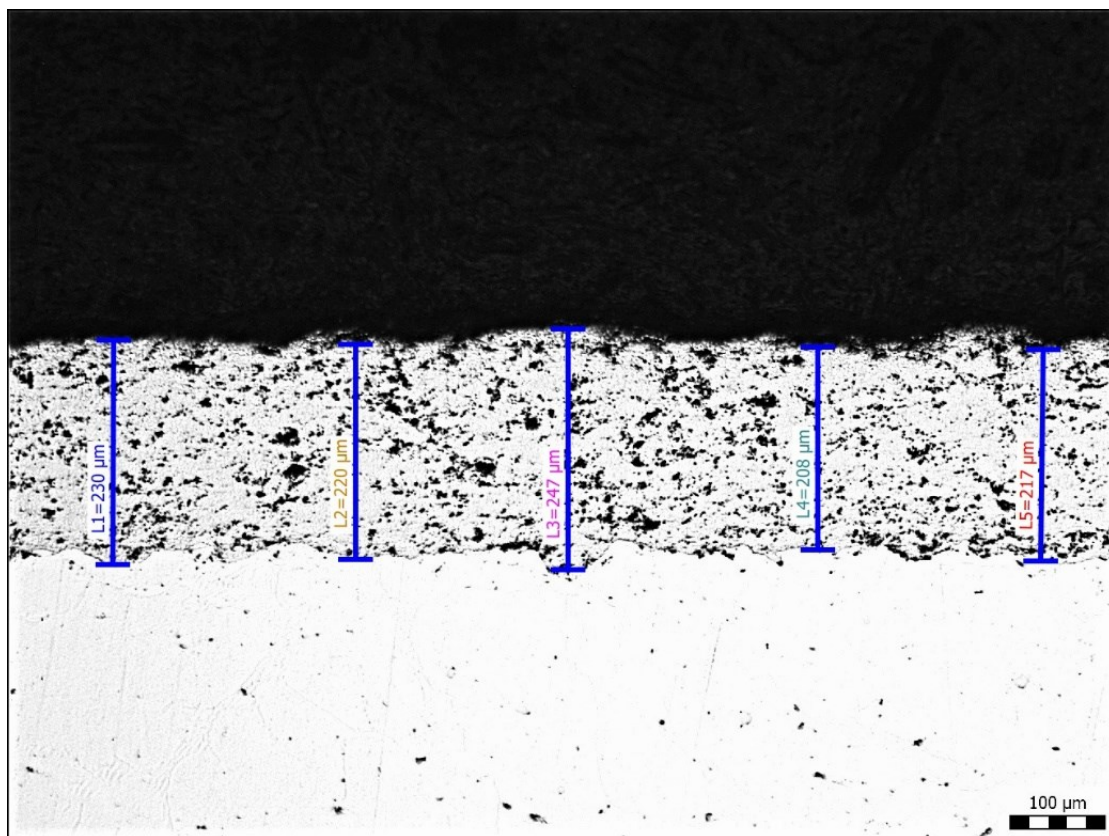




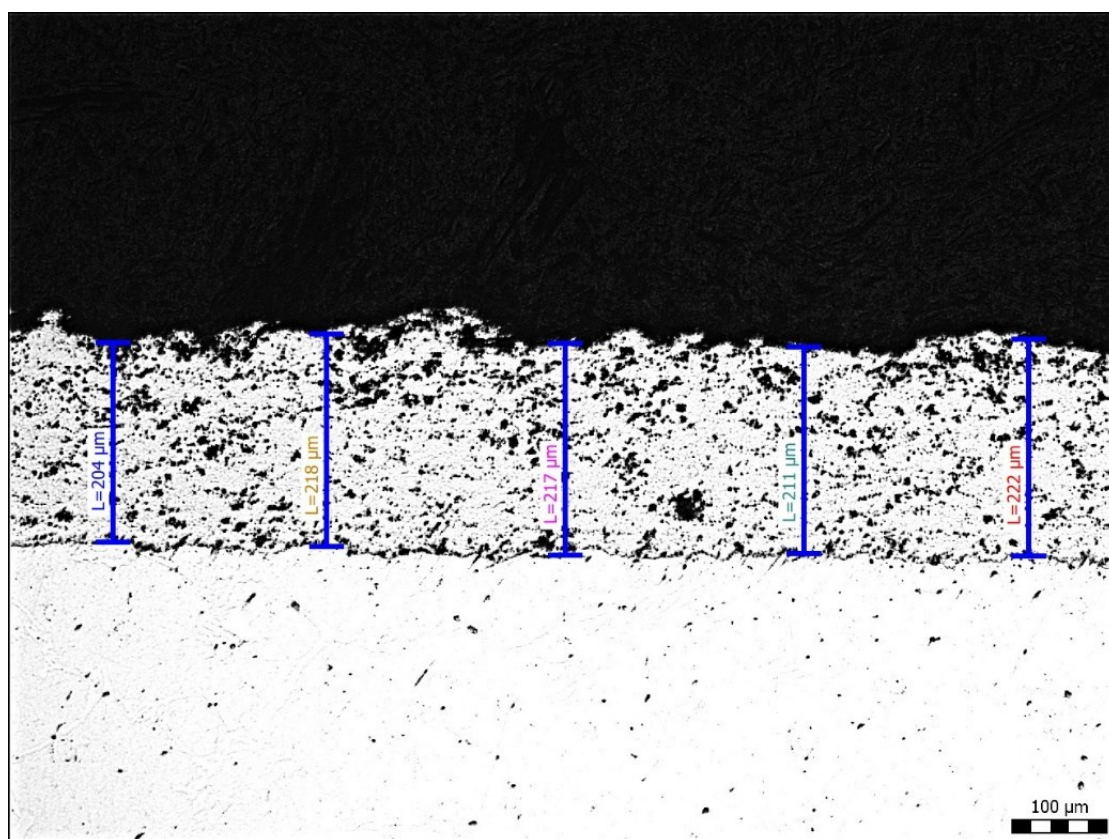
Obrázek 9.13 – Měření pórovitosti vzorku č. 4

### 10.5 Měření tloušťky nástriků

Pro měření tloušťky povlaku byly použity vzorky pro vyhodnocení mikrostruktury a tloušťka se měřila pomocí snímků pořízenými optickou mikroskopií, s použitím mikroskopu Olympus GX51 s využitím softwaru QuickPhoto industrial 3.1.. Měření bylo provedeno v kolmém řezu na povlak. Tloušťka se měřila v pěti různých místech povlaku. S ohledem na měřítko snímku lze tvrdit, že jedná o poměrně přesné měření.

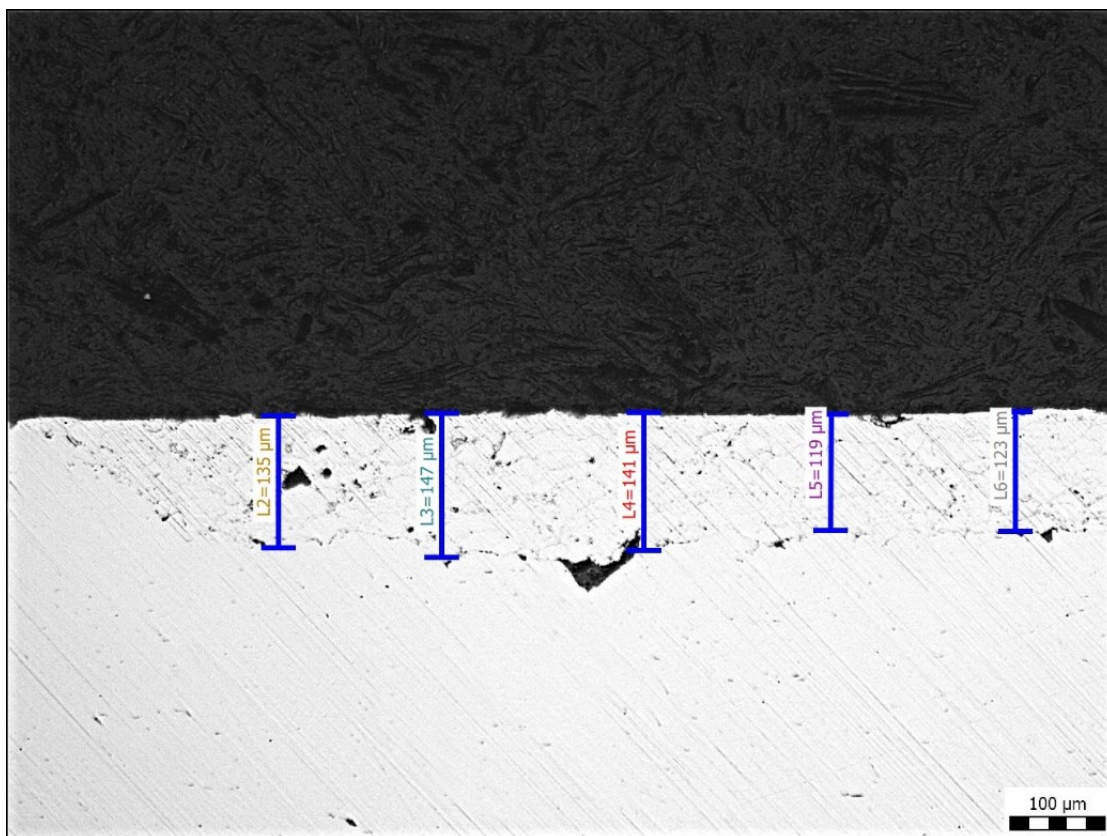


Obrázek 10.1 – Vzorek č. 1 zvětšení x50

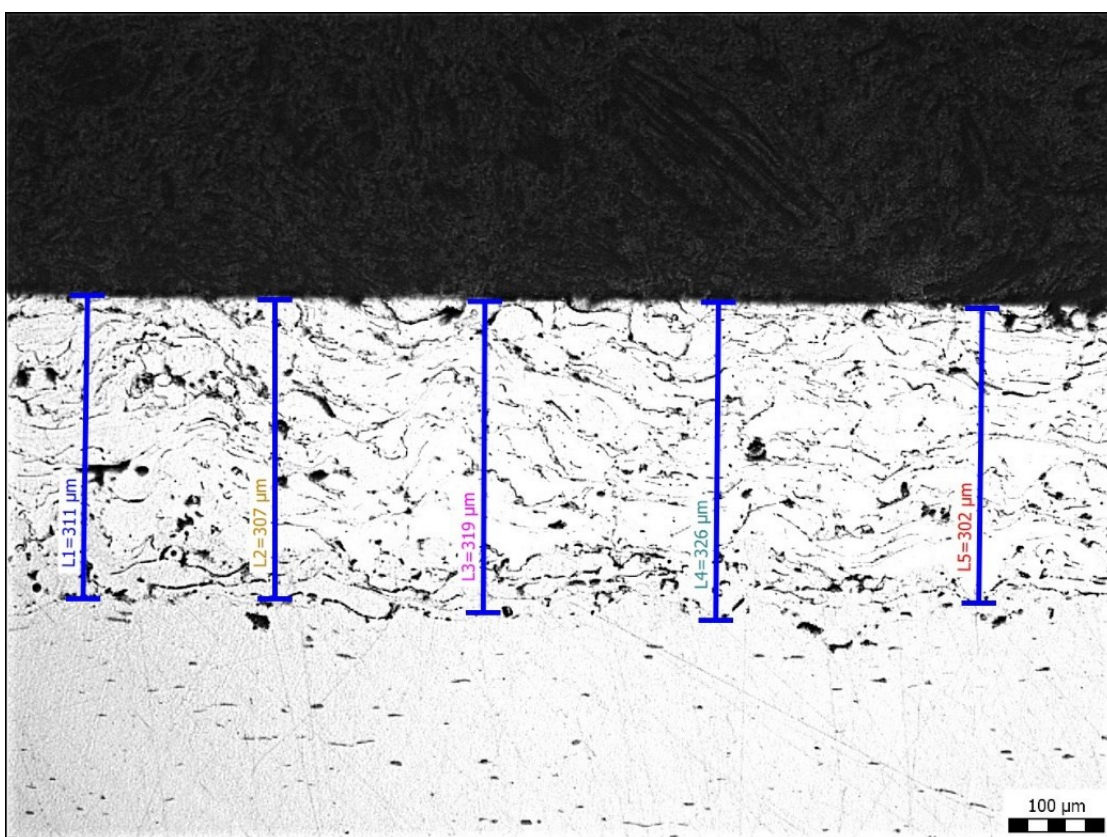


Obrázek 10.2 – Vzorek č. 2 zvětšení x50





Obrázek 10.3 – Vzorek č. 3 zvětšení x50



Obrázek 10.4 – Vzorek č. 4 zvětšení x50

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty tloušťky povlaku

Vzorek č.	Tloušťka L1	Tloušťka L2	Tloušťka L3	Tloušťka L4	Tloušťka L5	Aritmetický průměr tloušťky
1	230	220	247	208	217	224,4
2	204	218	217	211	222	214,4
3	135	147	141	119	123	133
4	311	307	319	326	302	313

## 10.6 Diskuze dosažených výsledků

Při zkoumání prvního vzorku, kde byl nastříkán nástřik od výrobce Praxair s označením 1310VM byla obrazovou analýzou snímku změřena pórovitost na hodnotu 2,79 %. Nástřik byl nastříkán metodou HVOF zařízením JP 5 000. Výrobce udává hodnoty pórovitosti nástřiku pod 2 %. Zvýšená pórovitost nástřiku může být zapříčiněna hrubým broušením, které může vytrhat částice nástřiku ven. Při hodnocení mikrostruktury nebyla nalezena žádná trhlina. Na snímcích mikrostruktury jsou vidět procesní vady jako póry, oxidy, vměstky.

Druhý vzorek s nástřikem od výrobce Woka s označením 3300 byl nastříkán zařízením JP 5 000. Pórovitost tohoto nástřiku dosahuje hodnoty 1,71 %, ačkoliv výrobce uvádí pórovitost pod hodnotu 1 %. To může být zapříčiněno vytrháním jednotlivých částic nástřiku při hrubém broušení, nebo použitím nevhodného zařízení pro nástřik. Ve snímcích mikrostruktury se neobjevili žádné trhliny a struktura povlaku je velmi podobná vzorku číslo 1. Což je zapříčiněno stejným chemickým složením prášků.

Na vzorku, kde byl nastříkaný Stellite 6, byla naměřena hodnota pórovitosti 1,71 %. Tato hodnota byla naměřena u vzorku číslo 3. Po zařazení ručního broušení bylo u Stellite 6 dosaženo hodnot pórovitosti pod 1 %. Výrobce Praxair uvádí, že pórovitost Stellite 6 dosahuje hodnot pod 2 %. Z toho plyne, že při použití zařízení JP 8000 pro nástřik Stellite 6 vhodný. Při hodnocení mikrostruktury je vidět, že v nástřiku nevznikly žádné trhliny. Na snímcích mikrostruktury se objevily procesní vady jako póry, oxidy a vměstky.

Vzorek číslo 4 byl nastříkán žárovým nástřikem pomocí elektrického oblouku, zařízením JP 2 000. Přídavný materiál byl ve formě drátu s označením 89 MXC Wire od firmy Praxair, který má shodné chemické složení jako ocel 17 247 dle značení ČSN 42 0002. Pórovitost nástřiku dosahuje hodnoty 1,27 %. Povlak má lamelární strukturu, což je

charakteristické pro povlaky nastříkané z drátu. Dále je možné na snímcích mikrostruktury vidět póry, oxidy a vměstky. Nástřík neobsahuje žádnou trhlinu.



## 11 Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou žárových nástřiků, zejména nástřiků metodou HVOF. V teoretické části jsem se zabýval principem žárových nástřiků a jsou zde popsány jejich výhody a nevýhody. Převážná teoretická část se věnuje technologii žárových nástřiků HVOF. Metodou HVOF vznikají velmi husté povlaky s nízkým obsahem oxidů a pórů vlivem vysoké rychlosti plamene, který dosahuje rychlosti okolo  $1600 \text{ m.s}^{-1}$ . Je možné nanášení cermetů, čistých kovů a jejich slitin, ale neumožňuje nanášení keramických povlaků, z důvodu nízké teploty plamene.

V kapitole 4 jsou stručně popsány základní mechanicko-fyzikální vlastnosti povlaků žárových nástřiků a jejich zkoušení.

Kapitola 5 je věnovaná přídavným materiálům na bázi wolfram karbidu a kobaltu pro metodu HVOF. Zejména jsem se věnoval materiálu Stellite 6, který se vyznačuje svou odolností vůči korozi, opotřebením a dobře odolává vysokým teplotám. Díky obsahu prvků jako je chrom a křemík vytváří povlak na povrchu oxidový film, který ucpává póry povlaku a zabraňuje šíření koroze skrz povlak. Těhle vlastnosti se využívá zejména jako ochrany proti horké korozi kotlových trubek.

Cílem bakalářské práce bylo metalografické šetření žárových nástřiků se zaměřením na jejich pórovitost a měření tloušťky vrstev nástřiku. Experiment zahrnoval čtyři vzorky rozdílných nástřiků, které byli od výrobce Praxair a Woka. Při měření pórovitosti se postupovalo dle normy ASTM E2109 – 01. V porovnání dosažených výsledků pórovitosti daných nástřiků s hodnotami uváděnými výrobcem, byly nástřiky 1310VM od firmy Praxair a 3300 od firmy Woka nad hodnotou pórovitosti uváděnou výrobcem. To může být zapříčiněno vytrháním jemných částic při hrubém broušení. Při srovnání naměřených hodnot pro materiál Stellite 6 bylo po zařazení jemného ručního broušení bylo dosaženo hodnot pod 1 %, přičemž výrobce uvádí pórovitost pod 2 %. Čtvrtý vzorek, který byl nástřikán, elektrickým obloukem a také odpovídal hodnotám uvedeným výrobcem. Při hodnocení mikrostruktury bylo zjištěno, že povlaky neobsahují žádné trhliny, pouze procesně závislé vady jako póry, oxidy a vměstky. Je nutno dodat že kvalita povlaků je velmi dobrá, ale při přípravě vzorků je nutné postupovat obezřetně, jelikož může dojít k znehodnocení výsledku, a rozdíl na výsledné pórovitosti může být i 1 až 2 %.

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za jeho ochotu a odbornou pomoc při psaní předložené bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Zdeňkovy Štorkánovy za pomoc při přípravě vzorků a realizaci experimentální práce.

## 12 Seznam použité literatury

- [1] DAVIS, Joseph R., et al. (ed.). Handbook of thermal spray technology. ASM international, 2004.
- [2] PAWLOWSKI, Lech. The science and engineering of thermal spray coatings. John Wiley & Sons, 2008.
- [3] About APS Plasma Spray and overview systems. FST Global Thermal Spray company - Systems & Equipment - Materials & Supplies - Coatings & Services - Flame Spray Technology [online] [cit. 2018-12-2] Dostupné z: <<https://www.fst.nl/systems/aps-plasma-thermal-spray-coating-system/>>
- [4] TRIBOLÓGIA : Aplikace plazmových nástřiků kovových a keramických povlaků. : TRIBOLÓGIA : [online]. Copyright © 2008 [cit. 15.04.2018] Dostupné z: <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42013/aplikace-plazmovych-nastriku-kovovych-a-keramickych-povlaku.html>>
- [5] ST Global Thermal Spray company - Systems & Equipment - Materials & Supplies - Coatings & Services - Flame Spray Techn [online] [cit. 2017-12-2] Dostupné z: <https://www.fst.nl/systems/hvof>
- [6] LI, Mingheng; CHRISTOFIDES, Panagiotis D. Modeling and control of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray: a tutorial review. Journal of thermal spray technology, 2009, 18.5-6: 753.
- [7] ANDREAS WANK, Bernhard Wielage, et al. Development and trends in HVOF spraying technology. Institute of Composite Materials. 2006, 5, s. 1-6
- [8] Hard-Wear Schweisstechnik GmbH [online] [cit. 2017-12-28] Dostupné z: <[http://www.hardwear-schweisstechnik.de/PDF-Files/Datenblaetter\\_en/Therm\\_Spritzpulver/DURMAT%20112%20WC-Co%2083%2017.pdf](http://www.hardwear-schweisstechnik.de/PDF-Files/Datenblaetter_en/Therm_Spritzpulver/DURMAT%20112%20WC-Co%2083%2017.pdf)>
- [9] AMPERIT 518 WC-co 83/17 [online] [cit. 2018-12-2] Dostupné z: <[https://www.hcstarck.com/en/products/amperitreg\\_thermal\\_spray\\_powders/carbides.html](https://www.hcstarck.com/en/products/amperitreg_thermal_spray_powders/carbides.html)>

- [10] DURMAT 112 WC-Co 88/12 [online] [cit. 2018-12-2] Dostupné z: [http://www.hardwear-schweisstechnik.de/PDF-Files/Datenblaetter\\_en/Therm\\_Spritzpulver/DURMAT%20111%20WC-Co%2088%2012.pdf](http://www.hardwear-schweisstechnik.de/PDF-Files/Datenblaetter_en/Therm_Spritzpulver/DURMAT%20111%20WC-Co%2088%2012.pdf)
- [11] M. M. Ferozhkhan, M. Duraiselvam, K. G. kumar, and R. Ravibharath, "Plasma Transferred Arc Welding of Stellite 6 Alloy on Stainless Steel for Wear Resistance," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 1305–1311, 2016.
- [12] M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková, E. Smazalová, and M. Hruška, "Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera," *Surface and Coatings Technology*, vol. 318, pp. 360–364, 2017.
- [13] M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková, E. Smazalová, and M. Hruška, "Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera," *Surface and Coatings Technology*, vol. 318, pp. 360–364, 2017.
- [14] SIDHU, T. S.; PRAKASH, S.; AGRAWAL, R. D. Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed stellite-6 coatings on Ni-and Fe-based superalloys. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201.1-2: 273-281.
- [15] GRABAU, Ted D. Composite dynamic valve seal assembly for high temperature control valves. U.S. Patent No 9,341,273, 2016.
- [16] G. A. Fontalvo and C. Mitterer, "The effect of oxide-forming alloying elements on the high temperature wear of a hot work steel," *Wear*, vol. 258, no. 10, pp. 1491–1499, 2005.
- [17] Praxair Surface Technologies [online]. Copyright © [cit. 19.05.2018]. Dostupné z: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/-/media/us/documents/brochures/hvof-brochure.pdf?la=en>
- [17-18] F. H. Stott and M. P. Jordan, "The effects of load and substrate hardness on the development and maintenance of wear-protective layers during sliding at elevated temperatures," *Wear*, vol. 250-251, no. 1, pp. 391–400, 2001.
- [19] SIDHU, T. S.; PRAKASH, S.; AGRAWAL, R. D. Hot corrosion studies of HVOF NiCrBSi and Stellite-6 coatings on a Ni-based superalloy in an actual industrial environment of a coal fired boiler. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201.3-4: 1602-1612.

- [20] Oerlikon Woka 3300 [online] [cit. 2018-12-2] Dostupné z:  
<[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:14pmKybWm1YJ:https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/oerlikon\\_DSMTS-0057.2\\_Woka3300\\_WC\\_10Ni.pdf%26download%3D1+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:14pmKybWm1YJ:https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/oerlikon_DSMTS-0057.2_Woka3300_WC_10Ni.pdf%26download%3D1+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)>
- [21] ASTM E2109-01, Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, [www.astm.org](http://www.astm.org)

## **13 Seznam příloh**

**Příloha 1:** Chemická analýza Stellite 6

**Příloha 2:** Parametry stříkání Stellite 6

**Příloha 3:** Parametry stříkání Woka 3300 a 1310VM

**Příloha 1:**

**Certificate of Analysis**

Date:	Our Order	Shipping Order
Product Name:	Item Number	Quantity UM
Co-106-8/1258F	032162-10	14
Praxair Specification: PS 032162	Lot Number:	Customer PO #:

**Chemistry**

<u>Element</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
Cobalt	<i>Balance</i>		Balance	Yes
Chromium	28.5	29.5	27.5	Yes
Carbon (total)	0.9	1.4	1.1	Yes
Iron		3.0	0.6	Yes
Manganese		1.00	0.004	Yes
Molybdenum		1.00	0.001	Yes
Nickel		3.0	0.2	Yes
Silicon	0.5	1.5	1.2	Yes
Total All Others		0.50	< 0.10	Yes
Tungsten	3.0	5.0	4.1	Yes

**Sieve Analysis - ASTM B214**

<u>Sieve</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
+200		0	0	Yes
+230		2	0	Yes
+270		5	1	Yes

**Microtrac**

<u>Micron Channel</u>	<u>Min.</u>	<u>Max.</u>	<u>Result</u>	<u>OK</u>
-22		5	5	Yes
-16		2	2	Yes
-11		1	1	Yes

Comments: Praxair Surface Tech Vendor #90506  
NSL Analytical Service Vendor

Authorized Signature:

## Technical Data

# Bulletin



Praxair Surface Technologies  
1555 Main Street  
Indianapolis, IN 46224



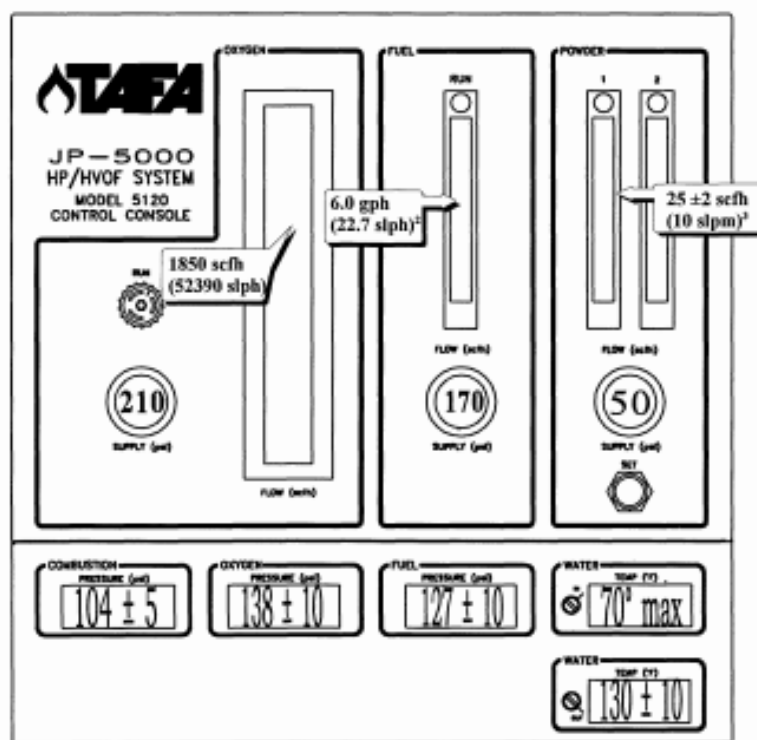
Praxair Surface Technologies  
TAFE Incorporated  
146 Pembroke Road  
Concord, NH 03301

File: 1.9.2.2SH-1265F  
Issue: M10520  
Original Issue

### SPRAY PARAMETERS 1265F Super alloy 625

Although spray parameters vary, the following settings are recommended as good starting points for this coating. Some modification may further enhance the coating quality.

Spray System:	JP-5000 HP/HVOF	Spray Rate:	13 lb/hr (98 g/min)
Gun Barrel:	6" Length	Feeder Speed:	370 rpm (6 Pitch Screw)
Spray Distance:	15" (380 mm)	Coating Thickness:	0.100" [.254 cm]



1. **Oxygen Flow** - The above flow setting is based on 210 psi supply pressure. For different supply pressures, use the Pressure Correction Chart in the Operation Section of the Manual to determine the correct flow for scfh specified above.
2. **Fuel Flow** - Users of older control consoles with a 0 to 100% tube in the fuel flowmeter should consult TAFE for the correct settings.
3. **Carrier Flow** - The needle valve above the powder feeder flowmeter should be left wide open and the flow should be adjusted with the needle valve on the console flowmeter. All flow rates are for nitrogen.

Copyright © 1997 TAFE Incorporated, Concord, NH - USA. All rights reserved.



## Technical Data

# Bulletin



Praxair Surface Technologies  
1555 Main Street  
Indianapolis, IN 46224



Praxair Surface Technologies  
TAFE Incorporated  
146 Pembroke Road  
Concord, NH 03301

## JP-5000 HP/HVOF

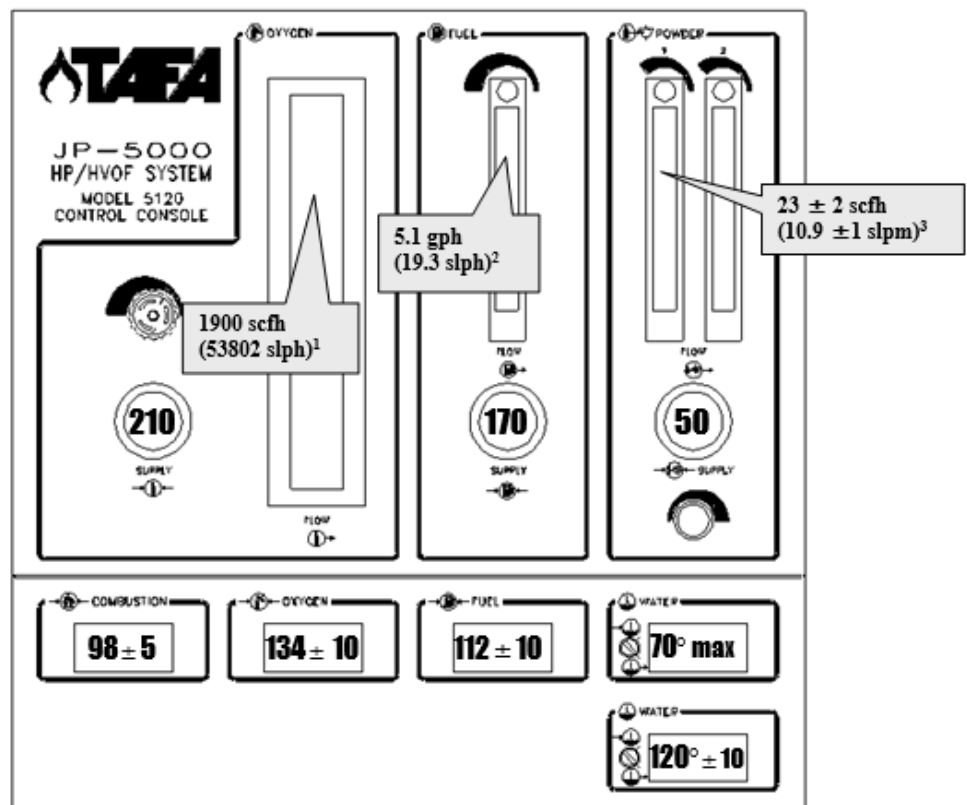
File: 1.9.2.2SH-1310VM  
Issue: M10910  
Original Issue

## Spray Parameters

### TAFE 1310VM Tungsten Carbide – 10 Nickel

Although spray parameters vary, the following settings are recommended as good starting points for this coating. Some modifications may further enhance the coating quality.

Spray System:	JP-5000 HP/HVOF	Spray Rate:	10 lb/hr (76 g/min)
Gun Barrel:	4" Length	Feeder Speed:	330 rpm (6 Pitch Screw)
Spray Distance:	15" (380 mm)	Coating Thickness:	0.050" (1.3 mm) Maximum



- Oxygen Flow** - The above flow setting is based on 210 psi supply pressure. For different supply pressures, use the Pressure Correction Chart in the Operation Section of the Manual to determine the correct flow for scfh specified above.
- Fuel Flow** - Users of older control consoles with a 0 to 100% tube in the fuel flowmeter should consult TAFE for the correct settings.
- Carrier Flow** - The needle valve above the powder feeder flowmeter should be left wide open and the flow should be adjusted with the needle valve on the console flowmeter. All flow rates are for nitrogen.